

## Review

# Biologische und pathologische Wirkungen der Strahlung von 2,45 GHz auf Zellen, Fruchtbarkeit, Gehirn und Verhalten

Isabel Wilke

## Zusammenfassung

**Aufgabenstellung:** Dieser Artikel ist ein systematischer Review von Studien zu den Wirkungen nicht-ionisierender Strahlung in der Mikrowellen(MW)-Frequenz 2,45 GHz (2.450 MHz), die hauptsächlich für WLAN/WiFi-Anwendungen (Wireless Local Area Network) und den Mikrowellenherd genutzt wird. Neuere WLAN-Standards nutzen auch die Frequenzen 5 GHz, 6 GHz und 60 GHz. Für viele Mobilfunk-Anwendungen setzt sich WLAN durch, weil WLAN lizenzfrei und für Nutzer kostenlos ist. Damit die Nutzer überall online sein können, werden immer mehr gepulste 2,45-GHz-WLAN-Sender (Access Points, Femto-Zellen, Router) in Bibliotheken, Krankenhäusern, Hotels, Flughäfen, Bahnhöfen, Shopping-Malls, auf öffentlichen Plätzen, in Bussen, S-Bahnen und Reisezügen aufgebaut. Spiele werden über WLAN-Konsolen gesteuert. Büro- und Haushaltsgeräte werden mit WLAN-Sendern ausgestattet. Heim-Router haben oft zwei WLAN-Sender. Die deutsche Kultusministerkonferenz hat beschlossen, dass für die „Digitale Bildung“ alle Schulen WLAN bekommen sollen. Die umfangreiche Forschungslage über gesundheitliche Risiken der WLAN-Strahlung wird dabei von den politischen Entscheidungsgremien und in der öffentlichen Debatte in der Regel nicht beachtet.

**Methode:** Für diesen Review wurden Studien v.a. in den Datenbanken livivo (zbmed) und PubMed recherchiert, ohne Einschränkung des Erscheinungsdatums. Die ausgewählten Studien sind in anerkannten Fachzeitschriften publiziert.

**Ergebnis:** Analysiert wurden mehr als 100 Studien zur Frequenz 2,45 GHz, die meist unterhalb der ICNIRP-Sicherheitsrichtlinien (in Deutschland als Grenzwerte in der 26. BImSchV festgelegt) Veränderungen gegenüber unbestrahlten Gruppen gefunden haben. Dokumentiert sind Studien zur Schädigung der Fruchtbarkeit, zur Einwirkung auf das EEG und Gehirnfunktionen, auf die DNA und die Krebsentwicklung, zu Wirkungen auf Herz, Leber, Schilddrüse, Genexpression, Zellzyklus, Zellmembran, Bakterien und Pflanzen. Als Wirkmechanismus identifizieren viele Studien oxidativen Zellstress. Negative Auswirkungen auf Lernen, Gedächtnis, Aufmerksamkeit und Verhalten sind Ergebnis zelltoxischer Effekte.

**Schlussfolgerungen:** Aufgrund der umfangreichen Forschungslage und der negativen gesundheitlichen Wirkungen, die in der überwiegenden Zahl der Studien gefunden werden, wird in Übereinstimmung mit offiziellen Verlautbarungen empfohlen, Maßnahmen zu ergreifen, um die Strahlungsbelastung zu verringern. Kabelgebundene Lösungen sollten bevorzugt werden. Die geltenden Grenz- und SAR-Werte schützen nicht vor den gesundheitlichen Risiken der WLAN-Strahlung. Die negativen Auswirkungen auf Lernen, Aufmerksamkeit und Verhalten begründen für Erziehungsinstitutionen aller Altersstufen einen Verzicht auf WLAN-Anwendungen. Aufgrund der zelltoxischen Wirkungen ist WLAN als Technologie in Krankenhäusern und für die Tele-Medizin nicht geeignet. WLAN sollte nicht in Schlafzimmern, an Arbeitsplätzen, in Aufenthaltsräumen, Krankenzimmern, Hörsälen, Klassenzimmern und in öffentlichen Verkehrsmitteln genutzt werden. Die möglichen Gefahren durch WLAN-Strahlung könnten umgangen werden mit der Erprobung alternativer Übertragungstechniken mit anderen Frequenzbändern, wie die optische VLC/LiFi-Technik (Visible Light Communication). Wenn sich als Übergangslösung WLAN nicht vermeiden lässt, muss nach dem ALARA-Prinzip gehandelt werden: kein dauerstrahlendes, sondern ein abschaltbares und leistungsgeregeltes WLAN.

**Keywords:** Hochfrequenz, Elektromagnetische Felder (EMF), gepulste Mikrowellen, 10-Hz-Taktung, WLAN/WiFi, 2,45 GHz, Zellschädigung

**Inhalt:**

<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Fortpflanzung und Fruchtbarkeit.....</b>	<b>3</b>
1.1. Auswirkungen auf Hoden und Spermien.....	3
1.2. Weibliche Fortpflanzung – Studien zu prä- und postnatalen Auswirkungen.....	4
<b>2. EEG, Gehirn und die Gehirnentwicklung.....</b>	<b>6</b>
2.1. Die Bedeutung der 10 Hz-Taktung.....	8
<b>3. Auswirkungen auf das Verhalten.....</b>	<b>8</b>
<b>4. Einflüsse auf die DNA – tumorinitiierendes und tumorpromovierendes Schädigungspotential .....</b>	<b>10</b>
4.1. Einflüsse auf die DNA.....	10
4.2. Einflüsse auf Krebs(zellen) .....	12
<b>5. Auswirkungen auf die Herzätigkeit .....</b>	<b>12</b>
<b>6. Wirkmechanismus oxidativer Zellstress .....</b>	<b>13</b>
6.1. WLAN führt zu oxidativen Zellschädigungen.....	13
6.2. Substanzen zum Schutz der Zellen .....	15
<b>7. Auswirkungen auf den Zellzyklus .....</b>	<b>16</b>
<b>8. Auswirkungen auf die Leber .....</b>	<b>16</b>
<b>9. Auswirkungen auf die Schilddrüse .....</b>	<b>17</b>
<b>10. Auswirkungen auf die Genexpression.....</b>	<b>17</b>
<b>11. Auswirkungen auf die Zellmembran.....</b>	<b>17</b>
<b>12. Auswirkungen auf Bakterien .....</b>	<b>18</b>
<b>13. Einflüsse auf Pflanzen .....</b>	<b>18</b>
<b>14. Studien, die keine Effekte gefunden haben .....</b>	<b>19</b>
<b>15. Diskussion und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>19</b>
<b>Anhang: Tabelle, Literatur, Register .....</b>	<b>21</b>

## Einleitung

Seit den 1980er-Jahren, mit dem massenhaften Aufkommen der Mikrowellenherde in Haushalten, hat sich die Wissenschaft dafür interessiert, welche Auswirkungen elektromagnetische Strahlung im Bereich von 2,45 GHz (Mikrowellen) auf Lebewesen hat. Seitdem wurden in zahlreichen Experimenten an Bakterien, Zellkulturen, Tieren, Pflanzen und auch am Menschen viele Wirkungen der Strahlung gefunden. Während der Mikrowellenherd kurzzeitig die Leckstrahlung als unerwünschte Nebenwirkung hat, stellen die WLAN- und Bluetooth-Einrichtungen, die seit einigen Jahren in sehr vielen Haushalten arbeiten, eine Dauerbestrahlung mit denselben Frequenzen dar. WLAN hat sich als eine der meistgenutzten Frequenzen durchgesetzt, sowohl bei der körpernahen Smartphone- und Tablet-Nutzung als auch in der Inhouse-Versorgung (Router, SmartHome, Internet of Things). Deshalb ist die Forschung auch in diesem Bereich angelaufen. In der Regel werden die Experimente zu WLAN-Strahlung mit einer scheinbestrahlten Kontrollgruppe und bestrahlten Gruppen durchgeführt, häufig mit verschiedenen Feldstärken und Einwirkzeiten. Hintergrund war und ist die Frage, ob die Strahlung dieser Frequenzen schädliche Wirkungen auf Mensch, Tier und Pflanze hat.

Im Jahr 2014 erschien im Springer Reference-Book „Systems Biology of Free Radicals and Antioxidants“ der WLAN-Review von [Naziroğlu/Akman](#), in dem darauf hingewiesen wird, dass auch schwache WLAN-Strahlung gesundheitsschädlich ist. Der Review stellte den Stand der Forschung dar und beschrieb bereits einen Schädigungsmechanismus. Die Studien, die seit 2014 zu WLAN erschienen sind, bestätigen die Analyse von [Naziroğlu/Akman](#). In diesem neuen Review sind Ergebnisse von WLAN-Studien wiedergegeben, die schädliche Auswirkungen auf die Zellen und Organe belegen, Unterschiede zwischen unbestrahlten Kontrollen und bestrahlten Proben feststellen konnten, ebenso wie Auswirkungen auf das Verhalten von Tieren und Menschen. Die Veränderungen durch die Strahlung waren meist deutlich unter den ICNIRP-Grenzwerten aufgetreten, die in den meisten Ländern etabliert sind (in Deutschland nach der 26. BImSchV). Dabei ist besonders zu beachten, ob die Untersuchungen akute oder chronische Einwirkung zum Gegenstand hatten, denn schließlich haben wir es im täglichen Leben mit chronischer Bestrahlung zu tun. Ist eine Studie mit kurzzeitiger Einwirkung der Strahlung angelegt, kann man – guten Gewissens – sagen: „Unter diesen Bedingungen konnten keine (statistisch signifikanten) Wirkungen festgestellt werden.“ Das sagt aber nichts über die Wirklichkeit der täglichen Bestrahlung aus. Es gibt verschiedene Studien, in denen die Wissenschaftler wissen wollten, welche Unterschiede in den Auswirkungen von GSM- (900 und 1.800 MHz) und WLAN-Frequenzen (2,45 GHz) bestehen. Meist war das Ergebnis, dass die WLAN-Strahlung stärkere Wirkungen als die GSM-Strahlung hervorruft. In einigen Tierversuchen wurde auch festgestellt, dass junge Mäuse oder Ratten empfindlicher auf die Strahlung reagieren als junge erwachsene oder alte Tiere. Die Forschungen untersuchen oft mehrere Endpunkte, z.B. stellen Studien den Zusammenhang Oxidativer Stress-

DNA-Strangbrüche-Spermienschädigungen dar, dadurch ergeben sich Überschneidungen in der Zuordnung zu den Kapiteln in diesem Review; in der Regel wurde nur für einen Endpunkt eingeordnet. Die immer wieder angeführte Aussage, es gäbe keine Wirkungsmechanismen, ist schon lange falsch – für 2,45-GHz-Strahlung ebenso wie für Mobilfunkfrequenzen. Hier sind viele Arbeiten zusammengetragen, die Mechanismen erklären: beispielsweise die außerordentlich oft belegte oxidative Schädigung, DNA-Strangbrüche, Veränderungen der Ionenkanäle, Beeinflussung von Transmittern im Hippocampus u.a.

## 1. Wirkung auf Fortpflanzung und Fruchtbarkeit

### 1.1. Auswirkungen auf Hoden und Spermien

Die Nutzung der Endgeräte erfolgt körpernah. Oft wird das Smartphone in der Nähe der Reproduktionsorgane getragen, steckt in der Hosentasche und ist mit einem Headset mit dem Ohr verbunden, oder der Laptop liegt auf dem Schoß. Zu zellschädigenden Wirkungen auf Spermien, Eierstöcke und Embryo liegen für die Frequenzen GSM, UMTS und WLAN mehr als 130 Studien vor. Deshalb empfiehlt die Österreichische Ärztekammer in ihren zehn Handyregeln: „Bei Verwendung von Headsets oder integrierter Freisprecheinrichtung Handys nicht unmittelbar am Körper positionieren – besondere Vorsicht gilt hier für Schwangere. Bei Männern sind Handys in der Hosentasche ein Risiko für die Fruchtbarkeit.“ Und der Mobilfunkkonzern Orange warnt auf seiner Homepage: „Halten Sie Ihr Mobiltelefon oder andere mobile Geräte weg vom Bauch einer schwangeren Frau oder dem Unterbauch von Jugendlichen.“ (<http://radio-waves.orange.com/en/your-mobile/best-practice>)

[Akdag et al. \(2016\)](#) bestrahlten männliche Ratten 1 Jahr lang (Langzeitbestrahlung) mit der Strahlung eines WLAN-Generators und untersuchten mehrere Organe auf DNA-Schäden (Gehirn, Haut, Leber, Nieren, Hoden, Ganzkörper-SAR 141,4  $\mu\text{W}/\text{kg}$ , Maximum 7127  $\mu\text{W}/\text{kg}$ ). Sie stellten fest, dass in allen Organen erhöhte DNA-Schädigung durch die Bestrahlung hervorgerufen wurde, aber nur im Hodengewebe war sie signifikant. Das Hodengewebe der Ratten reagiert offensichtlich empfindlicher auf 2,45-GHz-Strahlung als andere Organe. Empfehlung der Autoren: Männer sollten deshalb vorsichtig sein mit dem Laptop auf dem Schoß, denn die Fruchtbarkeit könnte beeinträchtigt werden. Die Arbeitsgruppe [Avendaño et al. \(2012\)](#) hatte außer DNA-Schäden weitere Auffälligkeiten gefunden: Die Beweglichkeit der Spermien von Laptopnutzern (26 – 45 Jahre alt) mit aktiver WLAN-Funktion war herabgesetzt, wenn der Laptop auf dem Schoß platziert war. Die Strahlung des Computers war 3-mal höher als ohne aktiviertes WLAN und 7–15-mal höher als bei der Kontrolle (kein Laptop). Die Anzahl der unbeweglichen Spermien war signifikant erhöht durch Laptop-Strahlung und die progressive Beweglichkeit signifikant geringer. Die Spermienqualität kann durch die WLAN-Funktion am Laptop vermindert werden und damit kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigt sein. [Dasdag et al. \(2015\)](#) haben die

Wirkung von 2,4-GHz-Strahlung eines Generators in 50 cm Entfernung auf die Hodenfunktionen bei Ratten untersucht, und zwar nach Langzeiteinwirkung. Eine Gruppe männlicher Ratten bekam 12 Monate lang 2,4-GHz-Strahlung 24 Stunden täglich (SAR für Punkt, 1 g und 10 g Gewebe von Hoden und Prostata betragen 4.880, 2.420 und 1.020  $\mu\text{W}/\text{kg}$ ), die andere Gruppe wurde scheinbestrahlt. Am Ende erfolgte die mikroskopische Untersuchung verblindet von Hoden, Samenleiter, Prostata und Bläschendrüse auf Gewicht und die Spermien auf Beweglichkeit, Konzentration in den Nebenhoden und auf morphologische Defekte (Schwanz- und Kopfdefekte, Durchmesser der Samenkanälchen und Dicke der Tunika albuginea). Die Gestalt der Spermien war signifikant verschieden in den beiden Gruppen. Signifikante Erhöhung gab es beim Prozentsatz der defekten Spermienköpfe nach Bestrahlung, signifikant vermindert waren Gewicht von Nebenhoden und Bläschendrüse, Durchmesser der Samenkanälchen und Dicke der Tunika albuginea (hier hochsignifikant). Alle anderen Parameter waren statistisch nicht-signifikant verschieden von den Kontrollen. Empfehlung der Autoren: Da Langzeitbestrahlung mit 2,4 GHz die Fruchtbarkeit beeinträchtigen kann, sollten Kinder und Jugendliche vor WLAN-Strahlung geschützt werden. **Kumar et al. (2011)** fanden an männlichen Ratten, dass 2,45 GHz (60 Tage 2 Stunden/Tag, 0,21  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 0,014  $\text{W}/\text{kg}$  SAR) oxidativen Stress hervorrufen und damit die Fruchtbarkeit herabsetzen. Melatonin und Testosteron im Serum wurden signifikant vermindert, Apoptoserate und Kreatinkinase (zum Energie-Transport) in Spermien signifikant erhöht. Ein gepulstes Feld von 100 Hz kann die schädlichen Wirkungen reduzieren, da der Magnetfluss zirkulierende elektrische Ströme im Gewebe erzeugt, die die freien Radikale abfangen. Kumar und Mitarbeiter schließen aus den Ergebnissen, dass 2,45 GHz während der Spermienentwicklung oder -reife Apoptose verursacht; die Caspase-3 scheint die Reproduktionsphysiologie oxidativ zu beeinflussen, was durch die 100-Hz-Pulsung gemindert werden kann.

**Meena et al. (2014)** und mehrere Arbeiten der Arbeitsgruppe von Prof. M. Nazıroğlu (s. Kapitel oxidativer Stress) haben Beeinträchtigungen der Hoden durch oxidativen Stress gefunden, der durch Melatonin gemindert wurde. **Shahin et al. (2014)** fanden schädliche Wirkungen bei männlichen Mäusen nach Bestrahlung mit 2,45 GHz MW (kontinuierliche Strahlung 2 h/Tag für 30 Tage, 0,029812  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,018  $\text{W}/\text{kg}$ ). Sie untersuchten Spermienzahl und -beweglichkeit, ROS-, Nitrat- und Nitrit-Produktion, Testosteron und Nitratoxidsynthase (iNOS) und das Enzym 3 $\beta$ -Hydroxysteroid-Dehydrogenase (3 $\beta$ HSD, ein wichtiges Enzym für die Steroid-Biosynthese) im Hoden. Das Hodengewebe war durch die Strahlung signifikant verändert. Die Samenkanälchen waren degeneriert und hatten einen signifikant geringeren Durchmesser und die Leydig-Zellen waren geschädigt. Man sah signifikant geringere Spermienzahlen (mehr tote Zellen) und geringere Beweglichkeit bei den bestrahlten Tieren im Vergleich zu den scheinbestrahlten Kontrollen. Die ROS-, Nitrat- und Nitrit-Konzentrationen, die Lipidperoxidation und antioxidativen Enzyme waren in Leber, Nieren, Hypothalamus und Hoden signifikant verändert, teilweise hoch-

signifikant, ROS besonders in Leber und Hoden. Im Hoden waren die Aktivität von 3 $\beta$ HSD und die Testosteronkonzentration signifikant reduziert. Es gab einen Anstieg der iNOS im Hoden. Die Autoren gehen davon aus, dass die 2,45-GHz-Strahlung Unfruchtbarkeit durch oxidativen und nitrosativen Stress (freie Radikale) sowie durch Degeneration des Hodengewebes hervorrufen könnte. **Shokri et al. (2015)** wollten an Rattenhoden prüfen, wie sich die Bestrahlung der Tiere mit 2,45 GHz (2 WLAN-Antennen an gegenüberliegenden Wänden im Raum, eine Gruppe 1 Stunde/Tag, eine 7 Stunden/Tag über 2 Monate) auf die Fruchtbarkeit auswirkt und untersuchten Apoptose, Spermien- und Gewebeveränderungen.

Die Auswertung erfolgte doppelblind. Die bestrahlten Tiere hatten signifikante Verminderungen des Gewichts der Bläschendrüse, der Spermienzahl und -beweglichkeit, stärker bei den höher bestrahlten Tieren. Im Hodengewebe sah man nach 1 Stunde Bestrahlung intaktes Keimepithel mit etwa 5 Zellschichten in den Hoden, nach 7 Stunden waren statistisch signifikante Schäden in der Keimzellschicht der Samenkanälchen sichtbar mit statistisch signifikant weniger Zellschichten. Die Apoptoserate und die Aktivität der Caspase-3 (das Enzym, das die Apoptose ausführt, nachdem sie von anderen Caspasen eingeleitet wurden) waren in der 7-Stunden-Gruppe signifikant erhöht in den Samenkanälchen. Empfehlung der Autoren: Angesichts der Ergebnisse und der immer stärker auftretenden WLAN-Netze sollte die Zeit, der man WLAN-Strahlung ausgesetzt ist, begrenzt werden.

## 1.2. Weibliche Fortpflanzung – Studien zu prä- und postnatalen Auswirkungen

Das weltweit renommierte schwedische Karolinska Institut in Stockholm hat am 3. Februar 2011 eine Pressemitteilung herausgegeben, in der vor Funkanwendungen (Mobil- und Schnurlostelefone, WLAN) gewarnt wird, da Gefahren für Kinder und schwangere Frauen bestehen. Die Grenzwerte müssen gesenkt werden: „*Current US and ICNIRP standards for radiofrequency and microwave radiation from wireless technologies are entirely inadequate. They never were intended to address the kind of exposures from wireless devices that now affect over 4 billion people.*“ (Olle Johansson, Professor, Department of Neuroscience, Karolinska Institute, Stockholm, [http://sagereports.com/smart-meter-rf/?page\\_id=382](http://sagereports.com/smart-meter-rf/?page_id=382)).

**Nakamura et al. (2000)** untersuchten, welche Auswirkungen kontinuierliche 2,45-GHz-Strahlung (2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  für 90 Minuten) auf Schwangerschaft, Uterus oder den Blutfluss zwischen Uterus und Plazenta, Hormone und biochemische Mediatoren (Corticosteron, Estradiol, Prostaglandin  $\text{E}_2$  und Prostaglandin  $\text{F}_2\alpha$ ) hat. Der Blutfluss wurde durch die Strahlung vermindert, Progesteron und Prostaglandin  $\text{F}_2\alpha$  nur in den trächtigen Tieren gesteigert. Die Steigerung von Corticosteron und Abnahme von Estradiol waren in trächtigen und nicht-trächtigen Tieren vergleichbar. Die Störungen im Kreislauf Uterus/Plazenta durch 2,45 GHz sind wahrscheinlich vom Prostaglandin  $\text{F}_2\alpha$  verursacht und könnten ein Risiko für

Schwangerschaften darstellen. **Margaritis et al. (2014)** untersuchten an 2 Drosophila-Stämmen (Tau-, Obst- oder Fruchtfliegen) die Eientwicklung in den Eierstöcken nach Einwirken von elektromagnetischen Feldern verschiedener Frequenzen und ob Drosophila als Testsystem (Biomarker) geeignet ist. Dazu wurden die Reproduktionskapazität (Fekundität) und die Apoptose (mit 2 Testmethoden) während der Oogenese untersucht, die regulär in bestimmten Entwicklungsstufen erfolgen muss. Weiter war Untersuchungsgegenstand, ob gepulste und kontinuierliche Strahlung unterschiedliche biologische Wirkungen hervorrufen. Die Ergebnisse sind für Mikrowellenherd, Bluetooth (geringste Feldstärke von 0,3 V/m in den ersten 7 Tagen) und WLAN (2,44 GHz, 2,1 V/m, 10 Hz gepulst, Pulsdauer 1 ms) dargestellt. Kontrollen waren unbehandelte und scheinbestrahlte Tiere. Alle Strahlungsarten, auch die geringen Felder von Bluetooth bis zu 22 V/m von Mobiltelefonen, zeigten statistisch signifikante Erhöhung der Apoptoserate und bei fast allen Frequenzen war die Fekundität zwischen 10 % (bei WLAN und Bluetooth) und 30 % (bei Mobil- und DECT-Telefonen) vermindert. Die Strahlung scheint an den Schaltstellen der Entwicklungsstufen der Eizellen noch unbekannte Mechanismen zu beeinflussen. Bei den Nachkommen war die Anzahl der Puppen signifikant vermindert. Die Autoren gehen davon aus, dass die Wirkungen nicht von den niederfrequenten Komponenten herühren, weil einige Geräte diese nicht haben, sondern Pulse verantwortlich sind. Bluetooth beispielsweise hat trotz der sehr geringen Feldstärke dieselben Schäden bei Apoptose und Reproduktion hervorgerufen wie ungepulste Signale eines FM-Generators, der eine 43-fach höhere Intensität von 13 V/m hatte.

**Özorak/Naziroğlu (2013)** untersuchten männliche Nachkommen von weiblichen Ratten, die während der Trächtigkeit mit 2.450 MHz, 900 und 1.800 MHz bestrahlt worden waren (1 Stunde/Tag, 5 Tage/Woche während der Trächtigkeit und 6 Wochen nach der Geburt mit 12  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  (10 V/m, SAR 0,01–1,2 W/kg Ganzkörper, Durchschnitt 0,18  $\pm$  0,07 W/kg)). Die Doppelblindstudie untersuchte Nieren und Hoden auf Spurenelemente (die Metalle Chrom, Kupfer, Eisen, Mangan, Selen und Zink), da diese als Kofaktoren bei antioxidativen Enzymen beteiligt sind, dann die oxidativen Parameter Lipidperoxidation, Glutathion und Glutathion-Peroxidase, die Vitamine A, E und  $\beta$ -Karotin in den Nieren- und Hoden-Geweben der 4, 5 und 6 Wochen alten Nachkommen. Die 4 Wochen alten Tiere reagierten empfindlicher auf die Strahlung als die älteren Tiere von 5 und 6 Wochen; der oxidative Stress erzeugte bei den 6 Wochen alten Tieren nur noch für TAS, Lipidperoxidation, Kupfer und Eisen signifikant verschiedene Werte im Vergleich zu den Kontrollen in den Nieren. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass 900, 1.800 und 2.450 MHz zu oxidativem Stress in Nieren und Hoden junger Ratten führen können, sichtbar an erhöhter Lipidperoxidation, oxidierbarem Eisengehalt und geringeren Konzentrationen an Spurenelementen, TAS und GSH in Nieren und Hoden von Tieren, die sich in der Entwicklung befinden, vergleichbar der Pubertät beim Menschen. **Shahin et al. (2013)** untersuchten weibliche Mäuse nach Bestrahlung mit 2,45 GHz (nicht-thermische Leistungs-

flussdichte von 0,033549  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,023023 W/kg, 2 Stunden/Tag über 45 Tage). Nach den 45 Tagen wurden Blut und Gewebe-Homogenisate von Leber, Nieren und Eierstöcken entnommen zur Bestimmung von Blutzell-Parametern (Erythrozyten, Leukozyten, das Verhältnis von Neutrophilen zu Lymphozyten, Hämoglobingehalt), DNA-Brüchen, NO,  $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$  (Nitrit/Nitrat), Progesteron ( $\text{P}_4$ ), Estradiol ( $\text{E}_2$ ), ROS und den antioxidativen Enzymen Superoxid-Dismutase (SOD), Katalase und Glutathionperoxidase (GPx). Bei den bestrahlten Tieren war ein signifikanter Anstieg von ROS, Hämoglobin, Gesamtzahl der Erythrozyten und Leukozyten, DNA-Strangbrüchen und Hormonen ( $\text{P}_4$  und  $\text{E}_2$  waren im Plasma erhöht gegenüber den Kontrollen, signifikant aber nur  $\text{E}_2$ ) zu sehen sowie signifikante Abnahme von NO und antioxidativer Enzym-Aktivität in allen 3 Organen. Die Mikrowellenstrahlung geringer Feldstärke erzeugt physiologische Stressreaktionen in trächtigen Mäusen und führte zum Absterben der Embryos. In den Eierstöcken sah man vergrößerte Follikel, die Zahl der Embryos war signifikant geringer und die Entwicklung blieb zurück. Die Autoren führen die schädlichen Auswirkungen auf den oxidativen Stress (ROS beeinträchtigen das antioxidative Abwehrsystem und können zu Apoptose führen), die Änderung der Progesteron- und Estradiol-Konzentrationen und DNA-Strangbrüche zurück. Die veränderten Leukozytenzahlen deuten auf entzündliche Vorgänge hin. Die 2,45-GHz-Strahlung ist ein starker Auslöser von oxidativem Stress.

**Sangün et al. (2015)** hatten in der ersten Längsschnittstudie zu dieser Strahlung untersucht, welche Auswirkungen langzeitige WLAN-Bestrahlung (2,45 GHz) auf Wachstum und Entwicklung von jungen weiblichen Ratten hat. Während der Embryogenese als der empfindlichsten Zeit können schwere Schäden durch äußere Einwirkung von Chemikalien oder Strahlung entstehen. Die jungen Weibchen bekamen Schein-, prä- und postnatale Bestrahlung (2,45-MHz-Bestrahlung je 1 Stunde pro Tag bis zur Pubertät mit 45,5 V/m im Nahfeld, SAR 0,143 W/kg Ganzkörperbestrahlung). In der Pubertät wurden Serum, Eierstock- und Hirngewebe gesammelt und der oxidative/antioxidative Status bestimmt. Es war chronischer oxidativer Stress in beiden Organen zu verzeichnen. Im Serum erfolgte die Bestimmung der Konzentrationen der Hormone Follikelstimulierendes Hormon (FSH), Luteinisierendes Hormon (LH),  $17\beta$ -Östradiol ( $\text{E}_2$ ) und des Insulin-ähnlichen Wachstumsfaktor-1 (IGF-1). Nur LH im Serum war nach prä- und postnataler Bestrahlung signifikant gestiegen gegenüber der scheinbestrahlten Kontrolle. Dazu kamen histologische Analysen von Hypothalamus und Eierstöcken zur Feststellung von Zell- und Gewebeveränderungen; es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Die pränatale Bestrahlung mit 2,45 GHz bewirkte Wachstumseinschränkungen und verzögerten Eintritt in die Pubertät bei den weiblichen Ratten. Die Strahlungsintensitäten waren im Bereich der internationalen Grenzwerte. Die chronische Einwirkung der WLAN-Strahlung, insbesondere während der intrauterinen Phase und frühen Kindheit, kann schädliche Auswirkungen auf Wachstum und Pubertät haben. Empfehlung der Autoren: Vorsorgemaßnahmen sollten besonders in der Nähe solcher Strahlungsquellen und

bei Langzeiteinwirkung ergriffen werden. [Yüksel/ Naziroğlu et al. \(2016\)](#) hatten weibliche Ratten ein Jahr lang mit 900, 1.800 und 2.450 MHz bestrahlt und danach Muttertiere und Nachkommen auf den Hormonstatus und oxidativen Stress untersucht (im Kapitel 6.1. zu oxidativem Stress beschrieben). Bei den 4, 5 und 6 Wochen alten Nachkommen waren insgesamt stärkere Auswirkungen der Strahlung zu sehen als bei den Muttertieren, besonders starke Unterschiede bei 2,45 GHz. Der Review von [Desai, Kesari und Agarwal \(2009\)](#) fasst die Ergebnisse von Studien zu Hochfrequenzwirkungen (Mobilfunk und 2,45 GHz) auf das Reproduktionssystem zusammen und schließt, dass neben anderen Schädigungen (DNA, Zellmembranen, Calcium-Homöostase u.a.) die männliche Fruchtbarkeit beeinträchtigt sein kann und die geltenden Grenzwerte gesenkt werden sollten. Zu demselben Ergebnis für alle Frequenzbereiche kommen sieben weitere Reviews: [Adams et al. \(2014\)](#), [Agarwal et al. \(2011\)](#), [Behari/Rajamani \(2012\)](#), [Bellieni/Pinto \(2012\)](#), [British Columbia Centre for Disease Control \(BCCDC\) \(2013\)](#), [Dama/Bhat \(2011\)](#), [Gye/Park \(2011\)](#), [La Vignera et al. \(2012\)](#).

## 2. Wirkungen auf das EEG, das Gehirn und die Gehirnentwicklung

Ob WLAN-Strahlung das EEG beeinflusst, dazu liegen inzwischen aussagekräftige Untersuchungen vor. Einige Arbeitsgruppen haben Untersuchungen dazu an Tieren (Ratten, Mäuse) und Menschen durchgeführt. Bereits 1995 kam Lebrecht von Klitzing in seiner Untersuchung zu dem Schluss, dass EEG-Daten von Menschen, die unter dem Einfluss niederfrequent gepulster elektromagnetischer Felder gewonnen werden, im Bereich der  $\alpha$ -Aktivität ( $\alpha$ -wellen 8–13 Hz, 5–100 Mikrovolt) sowohl während als auch einige Stunden nach der Exposition verändert sind. Dieser Effekt wurde durch Feldstärken hervorgerufen, die geringer sind als die festgelegten internationalen Grenzwerte. [Aggarwal et al. \(2013\)](#) haben das EEG von 12 männlichen jungen Ratten aufgezeichnet, nachdem die Tiere mit 2,45 GHz bestrahlt worden waren (2 Gruppen: scheinbestrahlt 4 Tiere und bestrahlt 8 Tiere, 1 Stunde/Tag 21 Tage lang,  $7,37 \times 10^{-4}$  mW/cm<sup>2</sup>, SAR 1,16 mW/kg). Die Temperatur, gemessen an den Tagen 0, 7, 14 und 21, erhöhte sich in beiden Gruppen kaum, bei allen Ergebnissen handelt es sich somit um nicht-thermische Wirkungen. Am Ende des Experiments waren 2 Tiere der bestrahlten Gruppe gestorben. Ab dem 22. Tag wurde das EEG an den anästhetisierten Tieren 3 Stunden lang gemessen. Der Verlauf der Reaktionen auf die Bestrahlung: Erst in der 2. Stunde wurden signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen in allen Frequenzbereichen gesehen, in der 3. Stunde im  $\theta$ - und  $\beta$ -Bereich. Die Reaktionen waren insgesamt im  $\theta$ - und  $\beta$ -Bereich stärker als bei den  $\alpha$ - und  $\delta$ -Wellen. Demnach können niedrige, chronisch einwirkende Feldstärken von 2,45 GHz möglicherweise psychopathophysiologische Störungen nach sich ziehen, weil die Elektrophysiologie der Nervenzellen verändert wird. Es erfolgt eine Änderung der Synchronisation/Desynchronisation der feuernenden Nervenzellen, die Auswirkungen auf die Blut-Hirn-Schranke und die Konzentration

der Neurotransmitter an den Synapsen hat, so die Forscher. [Sinha, Aggarwal und Mitarbeiter \(2008\)](#) untersuchten an männlichen Ratten das Verhalten, die Schilddrüsenhormone  $T_3$ ,  $T_4$ , TSH und das EEG nach Bestrahlung mit 2,45 GHz (2 Stunden täglich, 21 Tage lang,  $16,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , SAR parallel Ebene E  $3,6 \mu\text{W}/\text{g}$ , Ebene H  $9,8 \mu\text{W}/\text{g}$ ). Die Werte für  $T_3$  waren signifikant niedriger (100 zu  $78,8 \text{ ng}/\text{dl}$ ), die für  $T_4$  signifikant höher ( $1,24$  zu  $3,01 \mu\text{g}/\text{dl}$ ) als bei den Kontrolltieren. TSH und die Körpertemperatur unterschieden sich kaum zwischen den beiden Gruppen. Dies hatte auch Auswirkungen auf das Verhalten (siehe Kapitel 3., Verhalten). [Maganoti et al. \(2010\)](#) hatten Gedächtnistests an 15 Männern und 15 Frauen durchgeführt (Durchschnitt 23,7 Jahre, hoher Bildungsstand). Die Probanden sollten sich Zahlen merken, die auf ein Tonsignal folgten, einmal ohne und einmal mit Bestrahlung ( $0,49 \text{ V}/\text{m}$  am Kopf) mit einem WLAN-Accesspoint in 1,5 m Abstand zum Kopf des Teilnehmers. Die Testpersonen hörten über Kopfhörer Signale von 3.000 oder 500 Hz, sie sollten die Zahlen erinnern, die danach kamen. Der gesamte Test erfolgte mit 52 Wiederholungen innerhalb von 45 Minuten. Diese Tests wurden zweimal durchgeführt mit 2 Wochen Abstand. Die Ergebnisse zeigten, dass keine Unterschiede im  $\delta$ - und  $\theta$ -Band bestanden, weder zu Kontrollen noch zwischen den Geschlechtern, aber signifikante Unterschiede im  $\alpha$ - und  $\beta$ -Band. Das EEG zeigte ohne die Strahlung bei beiden Geschlechtern gleiche Werte. Nach Einschalten der 2,45-GHz-Strahlung stieg die Energie bei Männern nur unwesentlich an, während sie bei Frauen signifikant abnahm. Das  $\alpha$ -Band wird mit dem Langzeitgedächtnis in Verbindung gebracht,  $\beta$ -Aktivität mit Anspannung, Aufmerksamkeit und Konzentration. Die Ergebnisse deuten auf physiologische Änderungen durch die WLAN-Strahlung hin, die sich verschieden auf die Erregbarkeit der Hirnrinde bei Frauen und Männern auswirken.

Die Arbeitsgruppe von [Lai und Singh](#) hat in den 1980er-Jahren viele Experimente an Ratten durchgeführt, um die Mechanismen zu verstehen, die 2.450-MHz-Strahlung im Gehirn, besonders im Hippocampus hervorruft; welche neurologischen Funktionen verändert werden und wie das Verhalten beeinflusst wird. In den 1990er-Jahren kamen Experimente zu DNA-Schäden hinzu. 1983 testeten sie die Wirkung von 3 Drogen (Apomorphin, Amphetamin und Morphin) unter Kurzzeitbestrahlung und stellten fest, dass die Reaktionen der Tiere unterschiedlich waren. Die Forscher registrierten eine komplexe Natur der Mikrowellenstrahlung auf Gehirnfunktionen. In den folgenden Jahren untersuchten sie die cholinerge Aktivität unter Anwendung verschiedener Antagonisten (1987a, 1987b, 1988, 1989a, 1989b, 1991, 1994, 1996b). Man fand heraus, dass sowohl cholinerge als auch endogene Opioid-Neurotransmittersysteme im Gehirn am Defizit des räumlichen Lernens und des Gedächtnisses nach Einwirken geringer Felder von 2,45 GHz betroffen sind. Die Cholin-Aufnahme (als Maß für cholinerge Aktivität) im Hippocampus war signifikant vermindert, was durch  $\beta$ -Funktionsblocker verhindert werden kann. Räumliches Lernen und Gedächtnis waren beeinträchtigt, wenn die Strahlung einwirkte, aber nicht, wenn mit dem cholinergen Agonisten Physostigmin oder dem Opiat-Antagonisten Naltrexon vor-

behandelt worden war. Vorbehandlung mit dem peripheren Opiat-Antagonisten Naloxon-Methiodid hatte keinen Einfluss. Ein Konzentrationsanstieg der Muscarin-cholinergen Rezeptoren wurde im Hippocampus von Ratten gefunden, die 45 Minuten der Strahlung ausgesetzt waren; die Wirkung konnte durch Naltrexon verhindert werden. [Naziroğlu und Gümral \(2009\)](#) haben Ratten mit 2,45 GHz bestrahlt (28 Tage 1 Stunde täglich 11 V/m, SAR Ganzkörper 0,1 W/kg, lokal im Gehirn 1,73 W/kg), je eine Gruppe bekam zusätzlich vor der Bestrahlung Selen oder L-Carnitin i.p. verabreicht. Nach der Bestrahlung wurden sofort das EEG durchgeführt und anschließend die Gehirne im Doppelblindverfahren untersucht. Man bestimmte die Gehalte an Vitamin A, C und E, die Lipidperoxidation (LP), Glutathion (GSH), die Aktivität der Glutathion-Peroxidase (GSH-Px) und  $\beta$ -Carotin in den Gehirnen. Die Aktivität der GSH-Peroxidase war signifikant höher in der Selen-Gruppe, GSH und  $\beta$ -Carotin unterschieden sich nicht-signifikant von den Kontrollen. Die Lipidperoxidation war durch die Gabe von Selen signifikant vermindert, durch L-Carnitin deutlich stärker als durch Selen. Die signifikante Reduktion der Vitamine C und E durch die 2,45-GHz-Strahlung wurde signifikant verhindert durch Selen und L-Carnitin. Sowohl die Vitamine als auch L-Carnitin und Selen haben schützende Wirkung vor oxidativer Schädigung (ROS) des Hirngewebes. Im EEG war nur eine leichte Übererregbarkeit nach Bestrahlung zu sehen, die durch Selen und L-Carnitin kompensiert wurde.

Die Arbeitsgruppe um J. Orendacova hat eine Reihe von Studien zur Produktion und Entwicklung von neu gebildeten Nervenzellen durchgeführt, darunter 2 nach Bestrahlung von Ratten beider Geschlechter mit 2,45 GHz (2009, 2011). In der Untersuchung von [Orendacova et al. \(2009\)](#) wurden neugeborene (7 Tage alt) und erwachsene, alte Ratten (24 Monate) gepulster 2,45-GHz-Strahlung von 2,8 mW/cm<sup>2</sup> ausgesetzt. Die Frage war, ob man Unterschiede in der Entwicklung der Zellen sehen kann. Das erwachsene Gehirn enthält mindestens 2 Regionen für Nervenzellwachstum und -wanderung, die Subventrikularzone (SVZ) und den Gyrus dentatus im Hippocampus. Die neu gebildeten Zellen wandern vom Entstehungsort in andere Bereiche und reifen zu ausdifferenzierten Zellen heran. Die Tiere beider Altersstufen wurden in zwei Gruppen unterteilt: Bestrahlung 4 Stunden/Tag 2 Tage lang (akut) oder 8 Stunden/Tag 3 Tage lang (chronisch). Die Forscher konnten zeigen, dass bei den neugeborenen Ratten signifikante Unterschiede im Zellwachstum zwischen Kontrollen und bestrahlten Tieren auftraten, bei den 24 Monate alten Tieren jedoch nicht. Die Zellteilungsraten verändern sich dosis- und altersabhängig. An den Tagen 7–10 ist die Aktivität sehr hoch, fällt dann auf die Werte der Kontrollen ab und steigt von Tag 14–21 wieder an, um an Tag 35 wieder auf das Niveau der Kontrollen abzufallen. In der 1. Woche nach der Geburt sind Zellteilungsrate bzw. Entwicklung und Reifung der Nervenzellen besonders hoch, in dieser Zeit sind schädigende Einflüsse auf die Neurogenese zu befürchten, wie man bei neugeborenen Tieren nachweisen konnte. In der 2. Arbeit von [Orendacova et al. \(2011\)](#) wurden wieder 2 Altersstufen untersucht. Die Bestrahlung der Ratten beider Geschlechter erfolgte einmalig an Tag 7

(Neugeborene) oder an Tag 28 (junge Erwachsene) nach der Geburt (2 Stunden mit 2,8 mW/cm<sup>2</sup>, je 10 Tiere). Untersucht wurde nach der kurzen Bestrahlung auf das frühe Genprodukt Fos-Protein, das bei frühem Stress in Nervenzellen erhöht ist, und NO-produzierende Zellen, die nach Tag 7 die Neurogenese regulieren. Bei den bestrahlten Tieren traten signifikante Unterschiede in der Expression der frühen Gene im Vergleich zu den Kontrolltieren auf. NO-Zellen waren bei den bestrahlten Tag-7-Ratten schon an Tag 7 zahlreiche zu sehen, bei den Kontrolltieren erst an Tag 10. Bei den jungen erwachsenen Ratten (P28) waren ebenfalls Unterschiede in der Zahl der NO-Zellen gegenüber den Kontrolltieren zu sehen. [Papageorgiou et al. \(2011\)](#) testeten an 15 Männern und 15 Frauen (Durchschnittsalter ca. 24 Jahre) die Reaktionen, indem sie die P300-Wellen im EEG aufzeichneten. Die P300-Komponente ist aktiv bei Denk- und Erinnerungsprozessen. Die Probanden hörten unvollständige Sätze über Kopfhörer und mussten sie sinnvoll vervollständigen. Es gab signifikante Unterschiede in den Reaktionen zwischen bestrahlten und unbestrahlten Personen, aber auch zwischen Frauen und Männern. Während die Probanden unbestrahlt keine Unterschiede bei den Geschlechtern zeigten, gab es in der P300-Amplitude beim Einschalten des WLAN-Signals (0,49 V/m) bei den Männern eine signifikante Abnahme der Amplitude, bei den Frauen einen signifikanten Anstieg.

[Paulraj und Behari \(2006a\)](#) erforschten anhand der Calcium-abhängigen Proteinkinase C in der Entwicklung befindliche Hirnzellen von jungen männlichen Ratten und bestrahlten die Tiere mit 2,45 GHz (2 Stunden täglich, 35 Tage, 0,344 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 0,11 W/kg). Die Proteinkinase C ist an sehr vielen pathologischen Prozessen einschließlich Krebsentstehung in vielen Zellarten beteiligt. Im Nervengewebe reguliert es Ausschüttung von Neurotransmittern und Bildung des Langzeitgedächtnisses. Das Hirngewebe (gesamtes Gehirn, Hippocampus und Hirn ohne Hippocampus) wurde auf Aktivität der Proteinkinase C untersucht und es ergab sich eine signifikante Abnahme der Aktivität im gesamten Gehirn und im Hippocampus gegenüber der Kontrolle. Im Gehirn ohne Hippocampus gab es keinen signifikanten Unterschied zur scheinbestrahlten Kontrolle. Im Elektronenmikroskop waren vermehrt Gliazellen zu sehen. Chronische Einwirkung der 2,45-GHz-Strahlung könnte Wachstum und Entwicklung des Gehirns nicht-thermisch beeinträchtigen. Das könnte eine Erklärung dafür sein, wie die häufig gefundenen Veränderungen durch Hochfrequenz bei Lernen und Gedächtnis entstehen. [Testylier et al. \(2002\)](#) hatten an männlichen Ratten getestet, welche Auswirkungen 800 MHz und 2,45 GHz auf das Verhalten und die Acetylcholin(ACh)-Konzentration im Hippocampus haben. Die Bestrahlung erfolgte für 2,45 GHz 1 Stunde lang mit 2 mW/cm<sup>2</sup> oder 4 mW/cm<sup>2</sup> (Ganzkörper-SAR 3,26 bzw. 6,52 W/kg). Man fand bei 2 mW/cm<sup>2</sup> eine nicht-signifikante und bei 4 mW/cm<sup>2</sup> eine signifikante Abnahme der durchschnittlichen ACh-Konzentration (40 %) 7 Stunden nach der Bestrahlung. Die ACh-Ausschüttung nahm bereits bei Beginn der Bestrahlung ab und war 5 Stunden nach Bestrahlung am niedrigsten gegenüber der scheinbestrahlten Kontrolle, die bei der scheinbestrahlten Gruppe kontinuierlich leicht anstieg.

Es ist keine thermische Wirkung, da die Abnahme mehrere Stunden nach Ende der Bestrahlung am höchsten war. Eine Videokamera zeichnete das Verhalten der Tiere ab 4 Stunden vor bis zum Ende des Experiments auf. Es zeigten sich keine Unterschiede. [Yang et al. \(2010\)](#) wollten die Frage klären, wie sich gepulste 2,45-GHz-Strahlung (20 Minuten, SAR 6 W/kg) auf Mikroglia in Gehirnen von Mäusen (N9-Mikroglia-Maus-Zelllinie) auswirkt. Mikroglia sind Abwehrzellen im Nervensystem, die bei Verletzung oder Infektion des Nervengewebes aktiviert werden. Eine bestimmte Signalkette, der JAK-STAT-Signalweg, reguliert die Abwehrmechanismen, die auch aktiviert werden, wenn Strahlung einwirkt. Bei gestörter Regulation können Immunschwäche und Krebs entstehen. Die Bestrahlung bewirkte Veränderungen in der Genexpression verschiedener Gene, u.a. solche für den Tumor-Nekrose-Faktor (TNF- $\alpha$ ) und die induzierbare Stickstoffoxid-Synthase (iNOS), die an entzündlichen Reaktionen im Nervengewebe beteiligt sind. Übermäßige Aktivierung der Mikroglia kann zu degenerativen Erkrankungen führen (ALS, Alzheimer, Parkinson).

Die Ergebnisse zeigten, dass die Mikroglia durch die 2,45-GHz-Strahlung aktiviert wurden unter Beteiligung von TNF- $\alpha$ , NO und ROS, es folgte eine pro-entzündliche Reaktion und gleichzeitig wurde der JAK-STAT-Signalweg aktiviert. Die Strahlung stellt einen externen physikalischen Faktor dar, der über die Aktivierung der Mikroglia zu entzündlichen Prozessen und Schädigung des Nervengewebes führen kann. [Yang et al. \(2012\)](#) setzten erwachsene männliche Ratten 2,45 GHz aus (gepulst 20 Minuten, 65 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 6 W/kg) und wählten Stress-bezogene Gene zur weiteren Untersuchung aus. Von 2.048 Genen waren 3 Stunden nach der Bestrahlung im Hippocampus 41 relevante Gene signifikant verändert, 23 hoch- und 18 herunterreguliert (HSP, Stoffwechsel, Signaltransduktion, Zellskelett, Apoptose, Zellanheftung, DNA-Reparatur u.a.). 7 Gene betrafen die Stress-bezogenen Hitzeschockproteine oder Chaperone, davon vor allem die Gene für HSP27 und HSP70, deren Expression im Hippocampus signifikant erhöht war, speziell in den Pyramidenzellen des Ammonhorns (CA3-Region) und in den Granulazellen des Gyrus dentatus. Die beiden HSPs waren zu verschiedenen Zeitpunkten maximal erhöht, sie haben unterschiedliche Funktionen. Die Daten liefern direkte Beweise dafür, dass die 2,45-GHz-Strahlung Stressreaktionen im Hippocampus von Ratten auslöst.

### 2.1. Die Bedeutung der 10-Hz-Taktung

WLAN ist mit 10 Hz getaktet, deshalb sind die Ergebnisse des Experiments von 1968 im Bunker von Andechs von Dr. Rütger Wever (Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie: Seewiesen und Erling-Andechs) bedeutend. Er untersuchte die Wirkung der 10-Hz-Frequenz (im Bereich der  $\alpha$ -wellen 8–13 Hz, 5–100 Mikrovolt) auf den circadianen Rhythmus des Menschen. DIE ZEIT schrieb 1968 zu dem Experiment: „Nachdem Geophysiker festgestellt hatten, dass dieses elektromagnetische Feld – eine Wellenstrahlung von 10 Hertz – im Ablauf eines Erdentages Maximum und Mini-

mum durchläuft, also einen ‚Tagesgang‘ hat, war es für die Rhythmenforscher interessant zu prüfen, ob es vielleicht einen Einfluss hat auf des Menschen ‚innere Uhr‘. Zwei unterirdische Bunker, spiegelbildlich zueinander, wurden gebaut, der eine mit mehreren Lagen einer Eisenummantelung gegen das 10-Hz-Feld abgeschirmt. Versuchspersonen zogen ein und lebten in ihrem Wohn-Schlaf-Raum unter konstanten Bedingungen, vor allem aber ohne Uhr, ganz der eigenen, inneren Periodik hingegeben.“ Die Isolation der Versuchspersonen von der Umgebungsstrahlung 10 Hz wirkte sich aus: „Es verschiebt sich ... nicht nur der Wechsel zwischen Aktivität und Ruhe, sondern es verschieben sich synchron damit auch die sogenannten vegetativen Funktionen, zum Beispiel die Arbeit der Nieren, Körpertemperatur-Maximum und -Minimum ... Das gesicherte Ergebnis aus zehn solchen Experimenten: Der menschliche Organismus reagiert auf ein elektrisches Wechselfeld von 10 Hz.“ (<http://www.zeit.de/1968/08/im-bunker-sind-die-tage-laenger>)

R. Wever schreibt zu seinem Experiment: „Mit dem Nachweis einer Wirkung von 10-Hz-Feldern auf die circadiane Periodik des Menschen ist zugleich die Frage einer möglichen Wirkung dieser Felder auf den Menschen überhaupt beantwortet. Auch für diese Frage ist die Frequenz von ca. 10 Hz interessant: Die besonders stabile  $\alpha$ -Wellen-Komponente des Elektro-Enzephalogramms hat eine Frequenz von 10 Hz, ferner vibriert die gesamte Körperoberfläche von Warmblütern mechanisch mit einer Frequenz von etwa 10 Hz.“ ([Hecht 2017](#))

Zu den Auswirkungen der 10-Hz-Taktung von WLAN legte der Medizinphysiker [Lebrecht von Klitzing \(1995, 2006\)](#) schon vor Jahren erste nachvollziehbare Versuchsergebnisse vor, die Wirkungen auf das EEG und die Herzratenvariabilität gezeigt hatten. Diese Ergebnisse müssten von weiteren Forschergruppen repliziert werden. Die Literaturrecherche ergab, dass die Forschung zu der Frage, wie sich die 10-Hz-Taktung von WLAN auswirken könnte, unbefriedigend ist und dringend intensiviert werden sollte. Das Andechser Experiment bestätigt, dass der Mensch ein elektromagnetisches Wesen ist und die 10-Hz-Taktung eine größere Rolle in der Wirkung auf das Gehirn spielen könnte als bisher angenommen.

### 3. Wirkungen auf das Verhalten

Dass das Nervensystem durch nicht-ionisierende Strahlung beeinflusst wird, bestätigte 2015 der Schweizer Bundesrat: „Aus der Forschung liegen unterschiedlich gut abgesicherte Beobachtungen vor, wonach es noch andere biologische Effekte gibt, die nicht auf eine Erwärmung zurückgeführt werden können. Nach wissenschaftlichen Kriterien ausreichend nachgewiesen ist eine Beeinflussung der Hirnströme“ (Schweizer Bundesrat 2015). Die Wirkungen auf das EEG und Gehirn schlagen sich im Lernen, Gedächtnis und dem Verhalten nieder, Erkenntnisse, die für die Debatte und Entscheidungsfindung für die geplante Einführung von WLAN an Kindergärten, Schulen und Hochschulen im Zuge der sogenannten „Digitalen Bildung“ große Relevanz haben müssten.



**Cammaerts und Johansson (2014)** beobachteten das Verhalten von Ameisen auf ihren Laufstrecken, wenn sie verschiedenen Frequenzen ausgesetzt sind. Neben Mobilfunkstrahlung wurden auch WLAN-Router (30 Minuten 600 und 800  $\mu\text{W}/\text{m}^2$  Mittelwert) und Notebooks mit (5 Minuten, 300–500  $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ) und ohne eingeschalteter WLAN-Funktion angewendet (Abstand 20–30 cm von den Kolonien). Die verblindete Wiederholung der Experimente mit einem anderen Beobachter bestätigte die Ergebnisse. Die Ameisen zeigten schon wenige Sekunden nach Einschalten des WLAN-Routers gestörtes Verhalten, bis 30 Minuten steigerten sich veränderte Bewegungsmuster signifikant im Vergleich zu den Kontrollen ohne Strahlung. Erst nach 6–8 Stunden stellte sich wieder normale Futtersuche ein. Beim Notebook mit eingeschalteter WLAN-Funktion reagierten die Tiere innerhalb von Sekunden verstört, wirkten krank, bei deaktiviertem WLAN verhielten sie sich normal. **Chaturvedi et al. (2011)** haben bei männlichen Mäusen das Verhalten nach Bestrahlung (2 Stunden/Tag 30 Tage, 0,026  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,036  $\text{W}/\text{kg}$ ) beobachtet (weitere Parameter: Blutwerte, Spermienzahl und -beweglichkeit, DNA-Brüche in Gehirnzellen). Im Laufrad und Wasserlabyrinth verhielten sich die Mäuse nach 30 Minuten Bestrahlung signifikant verschieden von den unbestrahlten Tieren. Das räumliche Gedächtnis war beeinträchtigt. **Deshmukh et al. (2015)** verwendeten die Frequenzen 900, 1.800 und 2.450 MHz zur Untersuchung der Frage, welche Wirkungen chronische Mikrowellenbestrahlung geringer Intensität auf Lernfähigkeit, Gedächtnis, Hitzeschockproteine (HSP) und DNA-Schädigung in Rattenhirnen haben. 180 Tage lang wurden männliche Tiere mit sehr geringen Feldstärken bestrahlt (SAR  $5,953 \times 10^{-4}$ ,  $5,835 \times 10^{-4}$  bzw.  $6,672 \times 10^{-4}$   $\text{W}/\text{kg}$  2 Stunden/Tag, 5 Tage/Woche). Räumliche Orientierung, Lern- und Gedächtnisleistung waren bei allen 3 Frequenzen beeinträchtigt. In den Gehirnen waren HSP70-Gehalt und DNA-Strangbrüche signifikant erhöht. Die DNA-Schäden waren auch signifikant höher bei 1.800 und 2.450 MHz im Vergleich zu 900 MHz. **Deshmukh, Banerjee et al. (2016)** bestrahlten Ratten 90 Tage mit 900, 1.800 und 2.450 MHz (SAR für 2.450 MHz  $6,672 \times 10^{-4}$   $\text{W}/\text{kg}$ ) und untersuchten Verhalten, HSP70 und DNA im Hirngewebe. Es ergaben sich verminderte Hirnleistung wie oben, signifikant erhöhte Werte von HSP70 und DNA-Strangbrüchen, bei 2.450 MHz am stärksten. **Hassanshahi et al. (2017)** hatten 80 männliche Ratten in 2 Gruppen geteilt, eine wurde scheinbestrahlt, die andere mit 2,4–2,4835 GHz 30 Tage, 12 Stunden/Tag mit 23,6 dBm bestrahlt. Die Aktivität der bestrahlten Tiere unterschied sich nicht von der der scheinbestrahlten Kontrolltiere, aber die bestrahlten Tiere konnten signifikant schlechter bekannte und unbekannte Objekte unterscheiden. Die Expression vom Muscarinrezeptor 1 (für Acetylcholin) im Hippocampus stieg nach WLAN-Bestrahlung um das Doppelte an, der GABA-Transporter 1 (GAT1) unterschied sich bei den bestrahlten Tieren nicht von den Kontrollen. Zusammen mit früheren Ergebnissen kann man schließen, dass WLAN-Strahlung eine schädliche Wirkung auf Funktionen des Nervensystems hat, auf molekularer und Verhaltensniveau. Der Calcium-Fluss in den Neuronen könnte durch WLAN-Strahlung verändert sein. Eine der wichtigsten Funktionen des Gehirns ist die Bindung von

sensorischen Informationen, die durch verschiedene sensorische Kanäle transportiert werden. Dieser Prozess ist wichtig für Erfahrungen und den Umgang mit der Außenwelt. Verschiedene Hirnregionen wie Teile des Temporallappens, die viele sensorische Inputs empfangen/aufnehmen, sind an den Bindungsprozessen beteiligt. Es wird angenommen, dass Acetylcholin durch den Muscarin-Rezeptor zu den Integrationsprozessen der vielen Empfindungen beiträgt. Auch für den Neurotransmitter GABA ( $\gamma$ -Amino-Buttersäure) wird ein Zusammenhang gesehen.

**Henry Lai und seine Mitarbeiter** haben in den 1980er- und 1990er-Jahren und in den Jahren 2000, 2004 und 2005 viele Experimente mit elektromagnetischen Feldern durchgeführt, darunter auch einige mit 2,45 GHz. Sie untersuchten u.a. das Verhalten von Tieren (Mäusen und Ratten), physiologische Veränderungen im Gehirn (besonders Hippocampus, dem Bereich, in dem Lernen und Gedächtnis verarbeitet werden) und DNA-Schäden nach 45 Minuten (1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,6  $\text{W}/\text{kg}$  oder 2  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 2 Stunden, SAR 1,2  $\text{W}/\text{kg}$ ). 1996 wurden Einzel- und Doppelstrangbrüche in Rattenhirnen durch 2,45-MHz-Strahlung (2  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 2 Stunden, SAR 1,2  $\text{W}/\text{kg}$ ) gefunden. Einige Experimente ergaben, dass das cholinerge System betroffen ist, und zwar nicht nach 20 Minuten, aber nach 45 Minuten Bestrahlung mit 2,45 GHz, 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,6  $\text{W}/\text{kg}$ . Insgesamt ergaben einige Untersuchungen, dass physiologische Veränderungen im Neurotransmittersystem (Catecholamin, Serotonin, Acetylcholin) eintraten und damit das Verhalten beeinflusst wurde. Lai und Singh beziehen sich auf Experimente von Thomas et al. (1979, 1979, 1980) und **Wangemann/Cleary (1976)**, die in den 1970er- und 1980er-Jahren schon Veränderungen bei Ratten und Kaninchen festgestellt hatten. **Wang/Lai (2000)** untersuchten das Verhalten von Ratten im Wasserlabyrinth nach akuter gepulster 2,45-GHz-Bestrahlung. Die akute Exposition mit 2,45-GHz-Mikrowellen beeinflusste das Verhalten der Ratten signifikant. Die Wissenschaftler führen das veränderte Verhalten auf die Abnahme der cholinergen Aktivität im Gehirn der Tiere zurück (im frontalen Cortex und Hippocampus), das die 2,45-GHz-Strahlung verursacht. **Lai (2004)** stellte fest, dass das räumliche Lernen von Ratten (2,45 GHz kontinuierliche Strahlung, 2  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , Ganzkörper-SAR 1,2  $\text{W}/\text{kg}$ ) nur dann verändert war, wenn 2,45 GHz und zusätzliche Hintergrund-Magnetfelder von 60 mG (6  $\mu\text{T}$ ) vorhanden waren. **Li et al. (2008)** untersuchten die Wirkung von gepulsten 2,45 GHz, 1  $\text{mW}/\text{cm}^2$  für 3 Stunden täglich über 30 Tage (chronische Einwirkung) und fanden bei allen Ratten signifikante zunehmende Defizite beim räumlichen Lernen und Gedächtnis. Die Funktion der Glucocorticoid-Rezeptoren (GR) im Hippocampus war beeinträchtigt, da die intrazelluläre Verteilung (das relative Verhältnis der GRs in Zell- und Kernplasma) für die aktive Übertragung der Signale in den Zellkern verschoben war (5 unabhängige Experimente). In den Kontrollen fand man die meisten GRs im Zellplasma, dagegen wurden nach Bestrahlung mehr im Zellkern nachgewiesen. Die Wissenschaftler bestimmten die Glucocorticoide und es zeigte sich, dass die Corticosteronergehalte im Blut 24 Stunden nach Ende der Bestrahlung hochsignifikant erhöht waren gegenüber der Kontrolle. Die

Apoptoseraten im Hippocampus waren in allen untersuchten Regionen (CA1, CA3 und Gyrus dentatus) nach Bestrahlung hochsignifikant erhöht, besonders deutlich in der CA1-Region. Diese 3 Veränderungen können die Lerndefizite erklären. Sie könnten eine Folge der Mikrowellen sein, die Stress in den Zellen verursachen. Die Daten zeigen, dass Corticosteron ein wichtiger Regulator bei den Lerndefiziten durch Einwirkung der Mikrowellen ist, denn es ist seit langem bekannt, dass erhöhte Glucocorticoid-Konzentrationen das Lernen beeinträchtigen, bei Tieren und Menschen. Die Veränderungen der Corticosteron-Konzentrationen können die Lern- und Gedächtnisdefizite nicht allein erklären, so die Forscher, es müssten noch weitere biologische Moleküle durch die 2,45-GHz-Strahlung beeinflusst werden. Die Forscher weisen darauf hin, dass die Ergebnisse im Gegensatz zu den Ergebnissen von [Cassel et al. \(2004\)](#) und [Cobb et al. \(2004\)](#) (Mitarbeiter im Labor der US Air Force) stehen, die dieselben Bestrahlungsbedingungen hatten wie Li und wie auch Lai und Mitarbeiter, aber keine Verhaltensänderungen im Wasserlabyrinth fanden. [Cosquer/Cassel \(2004, 2005\)](#) beziehen sich auf Lai et al. und fanden nach Bestrahlung von Ratten mit geringen Feldstärken (1 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 0,6 W/kg 45 Minuten) keine Unterschiede im Verhalten. Dagegen ergaben Experimente von [Banaceur et al. \(2013\)](#), dass ein WLAN-Gerät nach Langzeiteinwirkung (2,4 GHz 2 Stunden/Tag, 30 Tage Ganzkörper-SAR 1,6 W/kg) die Gedächtnisleistung bei Mäusen veränderte, denen man 3 mit Alzheimer assoziierte Gene übertragen hatte (Amyloid- $\beta$ , Presenilin und Tau-Protein). Zum Vergleich wurden normale Mäuse auf dieselbe Weise behandelt (Bestrahlung und Scheinbestrahlung). Nach Ende der Bestrahlung wurde das Verhalten in Bezug auf räumliches Lernen und Gedächtnis, Ängstlichkeit und Bewegungsaktivität beobachtet. Nach der Bestrahlung fand man kaum Unterschiede in Gewicht, Körpertemperatur und Bewegungsaktivität der 4 Gruppen, aber die Ängstlichkeit der bestrahlten Alzheimer-Mäuse war geringer. Die Autoren deuten dieses Ergebnis als verbesserte Hirnleistung. [Shahin et al. \(2015\)](#) setzten Mäuse kontinuierlicher 2,45-GHz-Strahlung aus (15, 30 und 60 Tage Bestrahlung und 60 Tage Scheinbestrahlung mit 0,0248 mW/cm<sup>2</sup>, Ganzkörper-SAR 0,0146 W/kg 2 Stunden pro Tag). Beobachtung des räumlichen Lernens und des Gedächtnisses erfolgten im Wasserlabyrinth. Das Hippocampusgewebe wurde auf Veränderungen im oxidativen/nitrosativen Stress (Oxidation von DNA, Lipiden, Proteinen sowie Nitrit- und Nitratkonzentrationen), der antioxidativen Enzyme (SOD, Katalase, GSH-Px), der Morphologie der Nervenzellen im Mikroskop, der Apoptose und eines DNA-Reparatur-Proteins (PARP-1) in den Hippocampus-Regionen untersucht. Die Bestimmung der Kreatinkinase sollte Auskunft über den Energiezustand in den Zellen geben. Die Experimente wurden einmal wiederholt. Mit steigender Einwirkung der Strahlung wurden die signifikanten Beeinträchtigungen stärker gegenüber den scheinbestrahlten Kontrollen: degenerierte Nervenzellen, die antioxidativen Enzyme (SOD, KAT und GSH-Px) und die Kreatinkinase nahmen signifikant ab, die Konzentrationen von ROS/RNS, Lipidperoxidation, oxidative Schädigung von DNA und Proteinen sowie die Apoptose im Hippocampus nahmen signifikant zu. Lernen und Gedächtnis verschlech-

terten sich als Folge der Zellschäden. [Sinha \(2008\)](#) hat neben dem veränderten Verhalten der Ratten und des EEGs durch 2,45 GHz auch Beeinträchtigungen der Schilddrüsenhormone gefunden (s. Kapitel 9, Schilddrüse). Das Verhalten der bestrahlten Tiere unterschied sich signifikant von dem der unbestrahlten: Die bestrahlten Tiere erwiesen sich als hyperaktiv.

#### 4. Einflüsse auf die DNA – tumorigenes und tumorpromovierendes Schädigungspotential

DNA-Schäden sind häufig Folge von oxidativen Schädigungen verschiedener Strukturen und Moleküle in Zellen, wenn nicht eine direkte Schädigung durch Strahlung oder Chemikalien entsteht. Aus den oxidativen Schädigungen können sich viele weitere Störungen ergeben, z.B. veränderte Enzymaktivitäten und Zellmembraneigenschaften, DNA-Einzel- oder Doppelstrangbrüche. Die Frequenzen von Mobilfunk und WLAN können insofern indirekt zu Stoffwechselveränderungen und dadurch auch zu Krebs führen. DNA-Schäden sind vielfach nachgewiesen, schon in den 1990er-Jahren zeigten das mehrere Arbeiten.

##### 4.1. Einflüsse auf die DNA

Weltweit Beachtung fand z.B. die Arbeit von [Lai und Singh \(1995\)](#). Die Forscher fanden Einzel- und Doppelstrangbrüche in Rattenhirnzellen bei 2 mW/cm<sup>2</sup> (1,2 W/kg) gepulster Strahlung. Sofort nach der Bestrahlung waren die Strangbrüche nicht-signifikant, aber 4 Stunden nach der Bestrahlung signifikant erhöht gegenüber der Kontrolle. Nach Bestrahlung mit kontinuierlichen Feldern war der Anstieg nicht-signifikant. In 1996 wurden die DNA-Strangbrüche bestätigt, hier war aber kein signifikanter Unterschied zwischen gepulster und kontinuierlicher Strahlung zu sehen. 1997 wurde Ratten unter gleichen Bedingungen zusätzlich vor und nach der Bestrahlung mit Melatonin oder N-tert-butyl- $\alpha$ -phenylnitron (PBN) behandelt, die sehr wirksame Radikalfänger sind. Die DNA-Strangbrüche wurden damit vermindert (ausgewertet im Blindverfahren). Diese Ergebnisse sind ein Beweis dafür, dass die 2,45-GHz-Strahlung oxidativen Stress durch die Bildung von freien Radikalen in den Hirnzellen der Ratten erzeugt. Die Autoren Lai und Singh sagten schon damals, dass gehäuft auftretende DNA-Brüche in Hirnzellen zu neurodegenerativen Erkrankungen und Krebs führen können, und freie Radikale zu vielen Erkrankungen. Deshalb seien diese Ergebnisse wichtig für Gesundheitsbelange durch Mikrowellen. 2005 wurde ein weiteres Experiment von [Lai und Singh](#) durchgeführt mit 1 mW/cm<sup>2</sup> (0,6 W/kg, 2 Stunden) und einem zusätzlichen Magnetfeld von 45 mG (4,5  $\mu$ T). Die gepulste und kontinuierliche Strahlung erzeugte wieder signifikant höhere Einzel- und Doppelstrangbrüche, das 4,5- $\mu$ T-Feld allein ergab kaum Unterschiede zur Kontrolle, während die Kombination der Felder die DNA-Schädigung verminderte. [Akdag et al. \(2016\)](#) stellten an Rattengewebe DNA-Schäden fest, nachdem männliche Tiere über ein Jahr WLAN-Strahlung (141,4  $\mu$ W/kg Ganzkörper und 7127  $\mu$ W/kg

Maximum) ausgesetzt waren. Untersuchungen der Organe (Gehirn, Leber, Nieren, Haut und Hoden) ergaben in allen Fällen erhöhte DNA-Schäden bei den bestrahlten Tieren gegenüber den unbestrahlten Kontrolltieren, allerdings waren die Unterschiede nur im Hodengewebe signifikant. [Avendano et al. \(2012\)](#) konnten zeigen, dass die WLAN-Strahlung von Laptops die Beweglichkeit der Spermien vermindert und die DNA-Fragmentierung in Spermien erhöht (s. Kapitel 1). [Chaturvedi et al. \(2011\)](#) fanden 2011 heraus, dass bei Mäusen die DNA in Nervenzellen signifikant geschädigt ist, wenn die Strahlung 2 Stunden/Tag 30 Tage einwirkte. Sie haben bei männlichen Mäusen nach Bestrahlung (2 Stunden/Tag 30 Tage, 0,026 mW/cm<sup>2</sup>, SAR 0,036 W/kg.) außer Verhalten, Blutwerten (Zellzahlen, Hb, Enzyme), Spermienzahl und Spermienbeweglichkeit auch DNA-Brüche in Gehirnzellen untersucht. Die bestrahlten Gehirne hatten signifikant mehr Strangbrüche als die Kontrollen.

Die Arbeitsgruppe um [Deshmukh \(2013, 2015\)](#) und [Megha \(2015\)](#) hat in 3 Arbeiten an Rattenhirnen u.a. die DNA-Schädigung mit weit unter dem Grenzwert liegenden Feldstärken der ICNIRP (2 W/kg) untersucht. [Deshmukh et al. \(2013\)](#) untersuchten die Auswirkungen schwacher Mikrowellen von 900, 1.800 und 2.450 MHz über 30 Tage (SAR  $5,953 \times 10^{-4}$ ,  $5,835 \times 10^{-4}$  bzw.  $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg, 2 Stunden/Tag, 5 Tage/Woche) im Gehirn von Fischer-Ratten. Der Nachweis der DNA-Schädigung erfolgte mit dem Komet-Test. Alle Parameter des Komet-Tests zeigten nach Bestrahlung signifikante Unterschiede zur Kontrolle. Der Anteil der DNA-Strangbrüche war am höchsten bei 2.450 MHz. Man kann die Mikrowellen daher als genotoxische Agenzien bezeichnen. Wenn DNA geschädigt wird, kann das zu Zelltod, Krebs oder neurodegenerativen Erkrankungen führen, wenn das Reparatursystem überfordert ist. [Deshmukh et al. \(2015\)](#) haben die Lernfähigkeit von Ratten erforscht unter 900-, 1.800- und 2.450-MHz-Bestrahlung über 180 Tage, zusätzlich wurden Hitzeschockproteine (HSP70) und DNA-Schäden untersucht mit SAR-Werten wie in der zuvor beschriebenen Arbeit ( $5,953 \times 10^{-4}$ ,  $5,835 \times 10^{-4}$  und  $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg). Der Komet-Test zeigte auch hier signifikant erhöhte DNA-Brüche gegenüber der Kontrolle, aber auch signifikant erhöhte Werte der 1.800- und 2.450-MHz-Strahlung gegenüber 900 MHz. [Deshmukh et al.](#) fanden in beiden Arbeiten im Rattenhirn erhöhte DNA-Schäden (Strangbrüche) nach 30 bzw. 180 Tagen Bestrahlung mit sehr geringer Feldstärke ( $6,672 \times 10^{-4}$  W/kg). Die Forscher diskutieren, dass die Ursache mögliche indirekte Mechanismen über oxidative Prozesse mit freien Sauerstoff-Radikalen ist. In der Arbeit von 2015 wurden auch erhöhte Gehalte an Hitzeschock-Proteinen und verändertes Verhalten der Tiere gefunden (die bestrahlten Tiere brauchten mehr Zeit als die Kontrolltiere). In diesem Experiment wurden außer 2.450 MHz auch 900 und 1.800 MHz untersucht und das Ergebnis war, dass 1.800 und 2.450 MHz stärkere Auswirkungen hatten. [Megha et al. \(2015\)](#) haben die Gehirne von männlichen Ratten mit den Frequenzen 900, 1.800 und 2.450 MHz und den bereits beschriebenen geringen Intensitäten (SAR 0,59, 0,58 und 0,66 mW/kg) nach 60 Tagen Bestrahlung (2 Stunden/Tag, 5 Tage/Woche) untersucht. Neben oxidativen Stress-

markern GSH, SOD, CAT, PCO (Proteincarbonyl), MDA und Zytokinen wurde auch die DNA untersucht. Alle Parameter des Komet-Tests zeigten einen signifikanten Anstieg zur Kontrolle nach Bestrahlung, die größten Unterschiede wurden jeweils bei 2.450 MHz gemessen. Die Experimente ergaben neben oxidativem Stress und Entzündungsreaktionen DNA-Schäden in den Gehirnen der Ratten. Die 3 Arbeiten zeigen, dass die 3 Frequenzen DNA-Schäden verursachen und 2.450 MHz die stärksten Auswirkungen hat. [Gürler u.a. \(2014\)](#) haben die Wirkung von Knoblauchextrakt an Ratten untersucht. Man wollte wissen, ob Knoblauch schützt, wenn Mikrowellen mit nicht-thermischer Feldstärke (SAR 0,02 W/kg bzw. 3,68 V/m) auf die Tiere einwirken (1 Stunde/Tag für 30 Tage). Der Grenzwert liegt bei 0,08 W/kg für die Öffentlichkeit. Eine Gruppe erhielt täglich 1 Stunde vor der Bestrahlung Knoblauchextrakt oral verabreicht. Nach 30 Tagen wurden in Vollblut und Hirngewebe Lipidperoxidation (MDA), Proteinoxidation, DNA-Oxidation (Bildung von 8-hydroxydeoxyguanosine, 8-OHdG) untersucht. Es zeigten sich signifikant erhöhte 8-OHdG-Konzentrationen in Hirngewebe und Blutplasma der bestrahlten Gruppe gegenüber der Kontrollgruppe. Der Knoblauchextrakt verhinderte die Erhöhung der DNA-Oxidation (des 8-OHdG-Gehaltes). Die Proteinoxidation (AOPP-Konzentrationen) im Blut war signifikant höher als in der Kontrolle, der Knoblauch führte in der bestrahlten Gruppe zu Werten wie bei der Kontrolle. Das Hirngewebe und die Lipidperoxidation zeigten keine Unterschiede zwischen den 3 Gruppen. Fazit: 2,45-GHz-Bestrahlung mit niedrigen Feldstärken kann die DNA und Proteine in Hirngewebe und Blut von Ratten signifikant oxidativ schädigen, bestimmte Stoffe im Knoblauchextrakt können die oxidative Wirkung signifikant verringern. Der niedrige SAR-Wert von 0,02 W/kg könnte der Grund sein, dass keine erhöhte Lipidperoxidation auftrat.

[Kesari/Behari und Mitarbeiter \(2010a, 2010b, 2012\)](#) untersuchten ebenfalls Rattenhirne, nachdem die männlichen Tiere mit 2,45 GHz bestrahlt worden waren (35 Tage 2 Stunden/Tag 0,34 mW/cm<sup>2</sup>, 0,11 W/kg Ganzkörper). In den Gehirnen wurden mit dem Komet-Test signifikant erhöhte Doppelstrangbrüche in den bestrahlten Rattenhirnen festgestellt (Doppelblindverfahren), d.h. signifikante DNA-Schädigung. Zudem waren die Aktivitäten der Enzyme SOD, Glutathionperoxidase und Histon-Kinase vermindert und die der Katalase erhöht. Die Forscher weisen darauf hin, dass die signifikanten Änderungen, DNA-Schäden und oxidativer Stress, zu Tumorpromotion führen können. Das Gleichgewicht zwischen Schädigung und Reparaturvermögen ist gestört, was zu Mutationen oder Zelltod führen kann. [Maes und Mitarbeiter](#) hatten bereits 1993 in Lymphozyten von Freiwilligen einen etwa 3-fachen Anstieg an Chromosomenaberrationen und Mikrokernen festgestellt, nachdem deren Blutproben mit 2,45 GHz (50-Hz-Pulse, 80 mW/ml, 75 W/kg) 120 Minuten bestrahlt worden waren. Nach 30 Minuten war der Anstieg geringer. Schwesterchromatid-Austausch war nicht häufiger in den bestrahlten Proben. Die Autoren bemerken, dass dies ein überraschendes Ergebnis sei, da diese Strahlung zu schwach ist (nach noch heute gültiger Meinung der Vertreter des thermischen Dogmas), um direkt chemische Bindungen

zu brechen. **Paulraj und Behari (2006b)** haben Gehirne von 35 Tage alten männlichen Ratten auf DNA-Schäden geprüft. Die Feldstärken von  $0,344 \text{ mW/cm}^2$  ( $1 \text{ W/kg}$ ) wirkten 35 Tage lang für täglich 2 Stunden 5 Tage/Woche ein. Man fand signifikant erhöhte Einzelstrangbrüche in der bestrahlten Gruppe (Kontrolle  $24,11 \pm 4,47 \mu\text{m}$  bzw.  $41,011 \pm 4,66 \mu\text{m}$  Migration der DNA). Bei den gleichzeitig mit  $16,5 \text{ GHz}$  durchgeführten Experimenten war die gleiche Wirkung zu sehen. Auch hier wird die DNA-Schädigung als mögliches Risiko für Erkrankungen gesehen, für Beeinträchtigung neurologischer Funktionen und Entstehung degenerativer Erkrankungen. **1994** hatten **Sarkar et al.** an Gehirnen und Hoden von Mäusen nach Bestrahlung mit  $2,45 \text{ GHz}$  ( $1 \text{ mW/cm}^2$  kontinuierliche Strahlung, SAR  $1,18 \text{ W/kg}$ , 2 Stunden täglich) signifikant erhöhte DNA-Brüche gefunden im Vergleich zur Kontrolle, das ist unterhalb des ICNIRP-Grenzwertes. Die Forscher betonen, dass es keine thermische Wirkung ist und durch diese mutagene Wirkung das Risiko von Krebspromotion im Gehirn und in den Erbanlagen signifikant erhöht ist. Die Forscher schlugen schon damals vor, die Grenzwerte zu überprüfen. **Zotti-Martelli et al. (2000)** bestrahlten menschliche Lymphozyten zweier gesunder 27-jähriger Personen mit 3 verschiedenen Geräten pro Frequenz ( $2,45$  – weil das die Resonanzfrequenz von Wasser\* ist – und  $7,7 \text{ GHz}$ ,  $15$ ,  $30$  und  $60 \text{ min}$ ,  $10$ ,  $20$  und  $30 \text{ mW/cm}^2$ , verblindet ausgewertete Doppelansätze) und stellten mithilfe des Mikrokern-Tests fest, dass die Häufigkeit der Mikrokerns in den bestrahlten Lymphozyten mit der Dauer und der Feldstärke anstieg, bei den höheren Feldstärken und längerer Bestrahlungszeit signifikant. Bei beiden Probanden zusammen betragen die Werte für  $2,45 \text{ GHz}$ : Kontrolle  $2,5 \%$ , bei  $30 \text{ mW/cm}^2$  und  $15$ ,  $30$  bzw.  $60 \text{ Minuten}$   $7,5 \%$  und  $8,5 \%$  und  $11,5 \%$ . Der Zellzyklus war nicht verändert und es gab bei doppelkernigen Zellen keine signifikanten Unterschiede, auch gab es keine Temperaturerhöhung. Die Forscher weisen darauf hin, dass bei Radartechnikern vermehrt Neurasthenie, Gefäßschäden im Nervensystem und Krebssterblichkeit auftreten. Sie empfehlen Maßnahmen zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung.

#### 4.2. Einflüsse auf Krebs(zellen)

**Cig/Naziroğlu (2015)** untersuchten die Wirkung des Abstands von Quellen auf Apoptose, oxidativen Stress und Calcium-Anreicherung im Cytosol über TRPV1-Kanäle, hervorgerufen durch Mobiltelefone ( $900$  und  $1.800 \text{ MHz}$ ) und WLAN ( $2.450 \text{ MHz}$ ) bei Brustkrebs-Zellen. Der TRPV1-Kanal ist ein für Kationen, hier  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen, durchlässiger Ionenkanal, der bei schädlicher Hitze, oxidativem Stress und Capsaicin (CAP, ist Auslöser der Schärfe im Pfeffer/Chili) geöffnet wird. Die Untersuchung der Calcium-Signale, von ROS-Produktion, Zellüberleben und Apoptose ergaben, dass WLAN und Mobiltelefone in  $10 \text{ cm}$  Abstand signifikante oxidative Reaktionen und Apoptose in den Krebszellen erzeugten. Ein Abstand über  $10 \text{ cm}$  könnte einen gewissen Schutz gegen oxidativen Stress, Apoptose und zu hohe Konzentration intrazellulärer  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen bieten. Es gab keine signifikanten Unterschiede in  $20$  und  $25 \text{ cm}$  Abstand. **Czerska et al. (1992)** setzten menschliche Lymphozyten aus frischem Blut gepul-

ter und kontinuierlicher  $2,45\text{-GHz}$ -Strahlung aus ( $12,3 \text{ W/kg}$ ) und untersuchten die Zellen auf Entartung (im Mikroskop, 3 unabhängige Untersucher unter verblindeten Bedingungen). Kontrollen waren bei  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  scheinbestrahlte und mit Wärme behandelte Zellen ( $0,5$ ,  $1,0$ ,  $1,5$  und  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  darüber) als positive Kontrolle. Bei  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  hatte die kontinuierliche Strahlung keine erhöhte Anzahl entarteter Zellen hervorgebracht, aber es waren Zellschäden zu sehen; durch Temperaturerhöhung stieg die Zahl an. Die gepulste Strahlung erzeugte ohne Erwärmung eine signifikant gesteigerte Entartung. Durch Temperaturerhöhung entstand bei gepulster Strahlung die größte Anzahl entarteter Zellen. Kontinuierliche und gepulste Strahlung bewirken auf unterschiedliche Weise die Entartung der Lymphozyten (lymphoblastoide Transformation). **Naziroğlu, Tokat und Demirci (2012c)** hatten sich in einer Übersichtsarbeit mit der Rolle von Melatonin beim oxidativen Stress durch EMF (Nieder- und Hochfrequenz) im Zusammenhang mit dem Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ )-Signalweg bei Brustkrebs befasst. Die Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ )-Homöostase ist einer der wichtigsten Faktoren für die physiologische Funktion von Zellen, denn sie ist beteiligt an Zellwachstum, Signalübertragungen und Apoptose. Sie wird reguliert durch Ionenkanäle in den Zellmembranen und viele andere Zellbestandteile, auch Melatonin ist beteiligt. Melatonin wirkt auch als Radikalfänger bei oxidativem Stress. Die Forscher zogen  $89$  Arbeiten heran und kamen zu dem Schluss, dass Melatonin eine wichtige Rolle als Antioxidans, beim Calcium-Einstrom in die Zellen und als Hormon spielt. Bei Störungen der Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ )-Homöostase und der Melatoninkonzentration könnten Frauen, die nachts arbeiten, ein erhöhtes Risiko für Östrogen-abhängigen Brustkrebs haben, da durch Einwirken elektromagnetischer Felder nachts weniger Melatonin produziert wird. **Szmigielski et al. (1982)** setzten Mäuse  $2,45\text{-GHz}$ -Strahlung aus ( $1$  bis  $6$  Monate  $2$  Stunden täglich,  $6$  Tage/Woche,  $5$  oder  $15 \text{ mW/cm}^2$ ) und zum Vergleich wurden scheinbestrahlte, chronisch gestresste und mit der kanzerogenen Substanz Benzopyren behandelte Gruppen mitgeführt. Im Lauf des Jahres kam heraus, dass die Bestrahlung zu signifikant schnellerem Wachstum der Hauttumore führte und die Anzahl der Tumore nach  $10$  Monaten mehr als doppelt so hoch war wie bei den unbestrahlten Kontrollen.

#### 5. Wirkungen auf die Herztätigkeit

WLAN-Strahlung wirkt sich auch auf die Herztätigkeit und den Blutdruck aus. **Saili et al. (2015)** untersuchten den Strahlungseinfluss auf das Herz von Kaninchen. Die Wirkungen auf die Herztätigkeit wurden während der Bestrahlung ( $1$  Stunde) mit einem Accesspoint in  $25 \text{ cm}$  Entfernung aufgezeichnet, parallel gab es eine Gruppe unbestrahlter Tiere. Bei den bestrahlten Kaninchen wurde eine signifikante Steigerung der Herzfrequenz und des Blutdrucks festgestellt, die WLAN-Strahlung beeinflusste die Herzratenvariabilität. Das zeigt, dass die  $2,45\text{-GHz}$ -Strahlung die Regulation des Herz-Kreislauf-Systems verändert. Das EKG war nicht verändert. Die  $2,45\text{-GHz}$ -Strahlung von WLAN-Geräten wirkt wahrscheinlich auf Rezeptoren ein, was eine veränderte Bindung von Rezeptor und Ligand zur Folge hat. Der Ein-

fluss der Strahlung auf die Herzratenvariabilität bewirkt die höhere Herzfrequenz und den höheren Blutdruck. [Zhu et al. \(2016\)](#) fanden einen einleuchtenden Mechanismus zu Apoptose durch Mikrowellen in Herzmuskelzellen von Ratten. Die Bestrahlung erfolgte mit 50, 100, 150 und 200 mW/cm<sup>2</sup> für 6 min bei 2,45 GHz. Untersucht wurden ATP-Aktivität, die Atmungskette in den Mitochondrien, die Enzyme CK, LDH und AST, Troponin I, die oxidativen Parameter SOD, GSH und Lipidperoxidation, die Apoptose-Proteine (MAPK-Kaskade) und die Morphologie. Alle biochemischen Parameter waren signifikant dosisabhängig verändert, z.T. hochsignifikant; je höher die Dosis, desto stärker die Veränderung. Die Untersuchung des Gewebes im Licht- und Elektronenmikroskop zeigte dosisabhängige signifikante morphologische Veränderungen wie z.B. unregelmäßige Streifung der Herzmuskelzellen, Verfärbung der Zellkerne, weniger Mitochondrien mit zerstörten Membranen und andere degenerative Erscheinungen. Man fand außerdem signifikant erhöhte Apoptose-Proteine und Apoptoseraten, was bedeutet, dass die Strahlung für Apoptose der Herzmuskelzellen über den Mitochondrienweg verantwortlich ist. Insgesamt führt die Strahlung zu oxidativem Ungleichgewicht (oxidativem Stress), Mitochondrienfehlfunktionen und Apoptose in den Herzmuskelzellen. Weitere Nachweise für die Wirkungen auf die Herztätigkeit liefern die Untersuchungen [Kim MJ, Rhee SJ \(2004\)](#) (siehe Kapitel 8.2.) und zwei Arbeiten von [Lebrecht von Klitzing \(2014, 2016\)](#).

## 6. Wirkmechanismus oxidativer Zellstress

Die Bildung freier Radikale/reaktiver oxidativer Substanzen (ROS = reaktive Sauerstoffmoleküle, Reactive Oxygen Species) ist ein in allen Zellen vorkommender Vorgang, der beim normalen Stoffwechsel anfällt. Die Zellen können gegensteuern durch Einsatz antioxidativer Moleküle. Beide Prozesse befinden sich normalerweise im Gleichgewicht. Wird das Gleichgewicht durch äußere Einflüsse zu stark gestört, kann die Zelle die sogenannte Apoptose einleiten, den programmierten Zelltod. Beteiligt an diesen Prozessen sind u.a. reaktive Sauerstoff-Moleküle, dazu gehören Sauerstoff(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)-Radikale, Hydroxyl(OH)-Radikale und Wasserstoffsuperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Diese ermöglichen auch die ersten Schritte der Krebsentstehung (Einleitung, Initiation) und das Fortschreiten (Promotion), ebenso wie Schädigung der Zellmembranen und der DNA. Oxidativer Stress ist eine der am häufigsten untersuchten und belegten Wirkungen von nicht-ionisierender und nicht-thermischer Strahlung. Die oxidativen Mechanismen, die in biologischen Systemen ablaufen, sind gut verstanden und werden von seriösen Wissenschaftlern nicht gelehnt ([Becker 2007, Hecht 2015, Hensinger/Wilke 2016, Warnke/Hensinger 2013](#)). Oxidativer Stress entsteht, wenn oxidative Vorgänge durch freie Radikale die Fähigkeit der antioxidativen Prozesse zur Neutralisation übersteigen und das Gleichgewicht zugunsten der Oxidation verschieben wird. Verschiedene entzündliche Schädigungen in den Zellen können hervorgerufen werden, z.B. Oxidation von ungesättigten Fettsäuren, Proteinen und DNA: „*Freie Radikale sind durch eine hohe chemische Reaktivität gekennzeichnet.*“

*Ihre Bildung im Rahmen des Fremdstoffmetabolismus ist daher einer der bedeutenden Mechanismen, durch den verschiedene Agentien eine Zellschädigung verursachen können (...) Die Interaktion von freien Radikalen mit Zellbestandteilen kann dazu führen, dass sekundäre Radikale aus Proteinen, Lipiden oder Nukleinsäuren gebildet werden, die ihrerseits mit weiteren Makromolekülen reagieren und somit eine Kettenreaktion in Gang setzen und aufrechterhalten; auf diese Weise wird das Ausmaß der Zellschädigung deutlich verstärkt (...) Radikale können direkte Wirkungen hervorrufen, wie eine Zellnekrose oder Fibrose; sie können auch Spätfolgen haben, wie beispielsweise an der ihnen zugeschriebenen Bedeutung für die Tumorigenese.“ (Marquardt 1994: Lehrbuch der Toxikologie)*

### 6.1. WLAN führt zu oxidativen Zellschädigungen

Eine der wichtigsten Übersichtsarbeiten zu ROS publizierten [Yakymenko und Kollegen \(2016\)](#). Die Studie beschreibt den Schädigungsmechanismus der Mikrowellenstrahlung: die Erzeugung von ROS in Zellen und die oxidative Schädigung von DNA durch Entstehung einer Überproduktion freier Radikale, die die Zellsignalgebung stören, und die potenzielle Karzinogenität der Strahlung. Die Ergebnisse sind bemerkenswert: Von den 100 wissenschaftlichen begutachteten Arbeiten, die zu dieser Zeit zu erhalten waren, hatten 93 oxidative Schädigungen bzw. oxidativen Stress in biologischen Systemen herausgefunden; in vitro, bei Tieren, Pflanzen und beim Menschen. Darunter waren auch 12 Arbeiten, in denen 2,45 GHz einbezogen waren. Alle Studien waren mit Feldstärken unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte durchgeführt worden. Die Anzahl der Mikronuklei z.B. war schon bei 0,5 W/kg (Grenzwert 2 W/kg) erhöht, ROS werden schon bei 0,1 µW/cm<sup>2</sup> oder 0,3 W/kg gebildet. Eine Reihe von Enzymen ist an den Stoffwechsel- und Oxidationsprozessen beteiligt (NADH-Oxidase, Ornithindecarboxylase (ODC), Katalase, Superoxid-Dismutase (SOD), Cytochromoxidase und Na/K-ATPase). Geschädigt werden Zellstrukturen (DNA, Membranen, Mitochondrien, Ionenkanäle, Elektronentransportkette, Proteine u.a.), Ca<sup>2+</sup>-abhängige Signalkaskaden und es gibt Konformationsänderungen von Proteinen. Hat die Schädigung ein gewisses Ausmaß, wird u.U. die Apoptose eingeleitet. Eine starke Überproduktion von ROS und oxidative Schädigung von DNA können das Entarten von Zellen zu bösartigen Tumoren verursachen. Oxidativer Stress steht mit Krebsentwicklung in Verbindung. [Atasoy et al. \(2013\)](#) haben nachteilige Wirkung von normalen WLAN-Geräten (2,437 GHz) auf das Wachstum von Rattenhoden festgestellt. Sie hatten junge Tiere 24 Stunden/Tag 20 Wochen lang einer maximalen SAR von 0,091 W/kg ausgesetzt und verschiedene Parameter im Blutserum und im Hodengewebe bestimmt. Die gemessenen Parameter und die oxidativen/antioxidativen Moleküle und Enzyme (Malondialdehyd (MDA), Aktivitäten der Enzyme Xanthinoxidase, Superoxid-Dismutase, Katalase, Glutathion-Peroxidase) waren zumeist signifikant verschieden zwischen bestrahlter und unbestrahlter Gruppe. Die Ergebnisse zeigen, dass Dauerbestrahlung des ganzen Körpers mit einem WLAN-Router die im Wachs-

tum befindlichen Hoden oxidativ schädigt. Man hatte im Wachstum befindliche Tiere verwendet, weil deren Organe, insbesondere die Hoden, empfindlicher auf die Strahlung reagieren und weil Kinder in Schule und Zuhause viele Stunden vor Computer oder Laptop sitzen. [Chauhan et al. \(2017\)](#) haben ebenfalls an männlichen Ratten oxidativen Stress festgestellt, nachdem sie die Tiere 2 Stunden täglich über 35 Tage mit  $0,2 \text{ mW/cm}^2$  (Ganzkörper-SAR  $0,14 \text{ W/kg}$ ) eines Mikrowellenherdes bestrahlt hatten. Untersucht wurden Gehirn, Leber, Nieren, Hoden und Milz (3-facher Ansatz) auf Lipidperoxidation und Gewebeveränderungen. In Gehirn, Leber und Milz fand man signifikant gesteigerte Lipidperoxidation, dazu wurden Gewebeveränderungen in Gehirn, Leber, Hoden, Nieren und Milz im Lichtmikroskop im Vergleich mit den unbestrahlten Kontrolltieren gesehen. Die Kontrolltiere hatten normales Gewebe, während die Bestrahlung Degeneration des Hoden-Gewebes und beschädigte Spermazellen erzeugte und diese Veränderungen könnten Unfruchtbarkeit zur Folge haben. Die Autoren halten es für möglich, dass diese Veränderungen auch beim Menschen auftreten können. Im Gehirn sah man u.a. degenerative Veränderungen im Hippocampus, der für Lernen und Gedächtnis zuständig ist. In Milz, Leber und Nieren waren ebenfalls strukturelle Veränderungen bei allen bestrahlten Tieren zu sehen. [Eser et al. \(2013\)](#) haben Rattenhirne mit 900, 1.800, 2.450 MHz auf oxidativen Stress in frontalem Cortex, Kleinhirn und Hirnstamm untersucht, dazu auf Entzündungsprozesse (Interleukin- $1\beta$ ) und Apoptose (Caspase-3). Die Bestrahlung erfolgte 2 Monate lang 1 h täglich mit  $1,04 \text{ mW/cm}^2$  ( $1,04 \text{ W/kg}$  SAR). Fast alle Parameter waren nach Bestrahlung signifikant verändert gegenüber den unbestrahlten Kontrollen: Gewebeveränderungen im frontalen Cortex, Hirnstamm und Kleinhirn, oxidativer Status, Apoptose (Caspase-3) und Entzündungen (IL- $1\beta$ ). Degeneration der Nervenzellen und Apoptose waren am stärksten im frontalen Cortex und Hirnstamm nach Bestrahlung mit 2,45 GHz. Die Autoren geben an, dass durch diese Veränderungen Funktionsstörungen und Krebsentwicklung entstehen könnten. [Kumari et al. \(2012\)](#) untersuchten antioxidative Enzyme an erwachsenen männlichen Ratten (Bestrahlung 2,45 GHz, 2 Stunden/Tag 35 Tage lang mit  $0,22 \text{ mW/cm}^2$  Leistungsflussdichte, Ganzkörper-SAR  $0,15 \text{ W/kg}$ ). Nach der Bestrahlung wurde das Lebergewebe untersucht. Die 2,45-GHz-Strahlung induziert eine Überproduktion von freien Radikalen, dies führt zur Hemmung von antioxidativen Enzymen und letztendlich zu oxidativem Stress in der Leber, wodurch die Leberfunktion beeinträchtigt wird (s.a. Kapitel 8, *Leber*). [Othmann et al. \(2017\)](#) stellten an Ratten fest, dass die Nachkommen oxidativen Stress erleiden, wenn die Mütter der WLAN-Strahlung eines normalen WLAN-Routers (2,45 GHz) ausgesetzt waren. Bestrahlte Tiere hatten nur halb so viele Nachkommen wie die Kontrolltiere. In den ersten beiden Wochen nach der Geburt hatten die bestrahlten Jungen verzögerte Reaktionen, Gleichgewichtssinn und Reifung des Bewegungsapparates schienen beeinträchtigt zu sein. Die antioxidativen Enzyme im Gehirn waren signifikant verändert. Änderungen der Cholinesterase-Aktivitäten könnten Auswirkungen auf die entsprechenden Neurotransmitter und damit das Verhalten haben. Die WLAN-Strahlung störte vor-

übergehend das Redox-Gleichgewicht durch den oxidativen Stress, die oxidativen Beeinträchtigungen durch die Bestrahlung im Mutterleib werden offenbar im Erwachsenenalter ausgeglichen. Auch gab es bei den erwachsenen Tieren keine Auffälligkeiten im motorischen und emotionalen Verhalten. Die Studie zeigt, dass mütterliche Bestrahlung mit 2,45-GHz-WLAN-Frequenzen verschiedene nachteilige Auswirkungen auf die Nachkommen hat. Die Hirnentwicklung ist verzögert, Enzymaktivitäten durch oxidativen Stress sind verändert ohne sichtbare bleibende Verhaltensänderungen der erwachsenen Tiere. [Özorak et al. \(2013\)](#) haben an weiblichen Ratten untersucht, wie sich 900, 1.800 und 2.450 MHz von WLAN auf die oxidativen Verhältnisse in Nieren, Hoden und Nachkommenschaft auswirken. Bestrahlte wurden die trächtigen Tiere und die Nachkommen (1 Stunde täglich, 5 Tage/Woche, 6 Wochen lang, input  $12 \mu\text{W/cm}^2$ ,  $10 \text{ V/m}$ , Ganzkörper-SAR  $0,18 \pm 0,07 \text{ W/kg}$ ), die Auswertung erfolgte im Doppelblind-Verfahren. Die männlichen Nachkommen wurden auf ihre Entwicklung in den Wochen 4, 5 und 6 nach der Geburt untersucht. Gemessen wurden Lipidperoxidation, Glutathion, Enzymaktivität der Glutathion-Peroxidase und Antioxidantien Vitamine A, E und  $\beta$ -Carotin, Proteingehalt und Spurenelemente (Cr, Fe, Cu, Mg, Mn, Se, Zn) in Geweben von Nieren und Hoden. Viele Messwerte waren signifikant oder sogar hochsignifikant verschieden von der unbestrahlten Kontrolle, andere nicht-signifikant verändert. Die Forscher schlussfolgern, dass die Strahlung zu signifikantem oxidativem Stress in Nieren und Hoden während der Entwicklung beiträgt und verfrühte Pubertät der Nachkommen eintreten könnte. [Yüksel et al. \(2016\)](#) untersuchten den Hormonstatus von trächtigen Ratten und deren Nachkommen nach Langzeit-Bestrahlung mit 900, 1.800 und 2.450 MHz. Die Bestrahlung erfolgte 1 Stunde täglich 5 Tage/Woche über die gesamte Trächtigkeit, und die Nachkommen für insgesamt 1 Jahr ( $52 \text{ Wochen}$   $11 \text{ V/m}$ , Ganzkörper-SAR  $0,1 \text{ W/kg}$ ). Untersucht wurden Blutserum und Gebärmutter-Gewebe auf Lipidperoxidation und Enzymaktivitäten, GSH, antioxidative Vitamine A, C und E im Blutplasma der Mütter und die Hormone Prolaktin, Östrogen und Progesteron im Serum. Dazu wurde die Körpertemperatur der trächtigen Tiere gemessen. Die Auswertung erfolgte im Doppelblind-Verfahren. Die Ergebnisse zeigten bei den erwachsenen Tieren kaum Unterschiede in den oxidativen Verhältnissen, nur der Gesamt-Oxidationsstatus war nach Bestrahlung signifikant erhöht. Bei den Nachkommen war die Lipidperoxidation im Uterus signifikant höher in den bestrahlten Gruppen, die GSH-Px-Aktivität war signifikant geringer, bei GSH gab es keine signifikanten Unterschiede. Die Konzentrationen der Hormone: Fast alle gemessenen Werte unterschieden sich zwischen Kontroll- und Bestrahlungsgruppen, bei Prolaktin und Östrogen waren die Werte bei den erwachsenen Tieren bei 2.450 MHz stärker vermindert als bei 900 und 1.800 MHz. Bei den Nachkommen war Prolaktin ebenfalls signifikant, bei 2.450 MHz am stärksten vermindert. Die Körpertemperatur unterschied sich signifikant zwischen Kontroll- und bestrahlten Gruppen. Alle 3 Frequenzen erzeugten nach Langzeitbestrahlung (1 Jahr lang eine Stunde täglich, 5-mal/Woche) Änderungen der Hormonkonzentrationen und oxidativen Stress in den Muttertieren und

den Nachkommen. Die Forscher schließen nicht aus, dass bei längerem Bestrahlungszeitraum weitere Veränderungen auftreten, die auch beim Menschen vorkommen könnten, besonders bei jungen Teenagern, die ihr Mobiltelefon oft mehrere Stunden täglich nutzen.

## 6.2. Substanzen zum Schutz der Zellen

Als Antwort auf den oxidativen Stress haben Lebewesen die antioxidativen Abwehrmechanismen entwickelt, zudem können antioxidative Substanzen mit der Nahrung aufgenommen werden. Dazu gehören Catechine, Selen, die Vitamine A, C und E,  $\beta$ -Carotin und andere Pflanzenbestandteile. Obwohl es kaum noch weitere Beweise der oxidativen Wirkung hochfrequenter Felder bedurft hätte, also dass Mikrowellen freie Radikale und Peroxide erzeugen, so sind Experimente mit antioxidativen Substanzen bestens geeignet, dies zu bestätigen. Extrakte von Knoblauch, Basilikum, Olivenblättern und die Vitamine A, E und C wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen eingesetzt, um einerseits die oxidative Wirkung der Strahlung und andererseits die vor oxidativem Stress schützende Wirkung verschiedener Substanzen zu belegen. Die folgenden Arbeiten bestätigen sowohl die oxidativen bzw. antioxidativen Mechanismen in Zellen und Geweben, das Schädigungspotential von WLAN und die Wirkung schützender Substanzen. **Aweda et al. (2003)** hatten an Ratten untersucht, welche Auswirkungen eine Leistungsflussdichte von  $6 \text{ mW/cm}^2$  auf die Lipidperoxidation hat (2,45 GHz 8 Wochen). Es gab eine scheinbestrahlte Kontrollgruppe, bestrahlte Gruppe und Gruppen, die zusätzlich Ascorbinsäure (Vitamin C) und Tocopherol (Vitamin E) verabreicht bekamen. Anschließend wurde im Blutplasma die Höhe der Lipidperoxidation bestimmt. Die Bestimmung der freien Radikale und der Lipidperoxidation ergab, dass die bestrahlten Tiere signifikant höhere Werte als die Kontrolltiere hatten, die Gabe der Vitamine C und E reduzierten die oxidative Wirkung. Die Bestrahlung verursachte einen Anstieg der Lipidperoxidation innerhalb von 24 Stunden, nach etwa einer Woche fielen die Werte auf die Kontrollebene ab. Wenn die Tiere die Antioxidantien Vitamin C (Ascorbinsäure) und E ( $\alpha$ -Tocopherol) vor der Bestrahlung erhielten, war der Wert unterhalb der Kontrolle und stieg innerhalb des Untersuchungszeitraums an. Das heißt, die Strahlung erzeugt oxidativen Stress, der durch Antioxidantien kompensiert werden kann. Die Arbeitsgruppe **Aynali et al. (2013)** hat in der Schleimhaut oxidative Schädigung nach 2,45-GHz-Strahlung (1 Stunde/Tag, 28 Tage lang) festgestellt. Die Lipidperoxidation war signifikant erhöht, sie konnte durch die Gabe von Melatonin signifikant vermindert werden, ebenso wie die Aktivität der Glutathionperoxidase. **Ceyhan et al. (2012)** bestrahlten die Haut von 2 Gruppen männlicher Ratten (WLAN-artige 2,45 GHz gepulst, 1 Stunde/Tag 4 Wochen,  $64 \text{ mW/kg}$  auf der Haut) und untersuchten, ob  $\beta$ -Glucan eine schützende Wirkung gegen oxidativen Stress in der Haut hat. Die Aktivitäten der antioxidativen Enzyme SOD, GSH-Px und Katalase sowie die Lipidperoxidation wurden in Hautproben gemessen. Die Strahlung erzeugte signifikant erhöhte

Lipidperoxidation und Katalase-Aktivität und signifikant verminderte Aktivitäten von SOD und GSH-Px. Die Behandlung mit  $\beta$ -Glucan erhöhte die Katalase-Aktivität leicht und verhinderte die Abnahme der GSH-Px-Aktivität nicht-signifikant gegenüber den Kontrollen. Die Lipidperoxidation war durch  $\beta$ -Glucan signifikant niedriger, fast auf dem Niveau der Kontrollen. Diese Arbeit zeigt eine weitere Substanz als Schutz vor oxidativem Stress durch Strahlung. **Gümrall und Nazırođlu (2009)** stellten im Blutplasma von männlichen Ratten nach Bestrahlung mit 2,45 GHz (SAR  $0,1 \text{ W/kg}$ ,  $11 \text{ V/m}$ , 1 Stunde/Tag 28 Tage lang) oxidativen Stress fest, der durch L-Carnitin verhindert werden konnte, Selen hatte keine schützende Wirkung.

**Kim und Rhee (2004)** (s. auch Kapitel 5, Herzfähigkeit) fütterten Ratten mit Grüntee-Catechinen und fanden heraus, dass diese vor Mikrowellen-induziertem oxidativem Schaden am Herzgewebe schützen. Herzgewebe ist besonders empfindlich gegenüber oxidativem Stress, der zu Erkrankungen wie Hochdruck und Herz-Kreislauf-Störungen führen kann. Der Polyphenol-Bestandteil Catechin ist ein sehr wirksames Antioxidans, das in grünem Tee zu finden ist und freie Radikale abfängt. Das Oxidase-System wurde aktiviert, die Bildung von Superoxid-Radikalen, Lipidperoxiden, oxidierten Proteinen und Lipofuscin stieg an und das antioxidative Abwehrsystem im Herzgewebe wurde bei den der Strahlung ausgesetzten Ratten geschwächt, aber die oxidative Schädigung war durch die Catechingabe signifikant reduziert. Die Arbeitsgruppe um Prof. Mustafa Nazırođlu hat in den letzten Jahren mehrere Experimente zu oxidativem Stress durchgeführt, davon auch welche mit Gabe von Substanzen, die die schädliche Wirkung von Mikrowellen kompensieren können. **Türker et al. (2011)** verabreichten Ratten Selen und L-Carnithin zusätzlich zur 2,45-GHz-Bestrahlung (1 Stunde/Tag 28 Tage lang) und bestimmten die Lipidperoxidation und die Konzentrationen der antioxidativen Substanzen Vitamin A, C und E im Herzgewebe. Die bestrahlten Gruppen zeigten signifikant höhere Lipidperoxidation, die durch Selen und L-Carnithin signifikant vermindert wurde. Die Konzentrationen der Vitamine C, A und E waren vermindert bei den bestrahlten Tieren, jedoch höher bei den mit Selen und L-Carnithin behandelten. Die Aktivität des Enzyms Glutathionperoxidase war ebenfalls höher. Insgesamt hatte die 2,45-GHz-Strahlung oxidativen Stress im Herzen der Ratten verursacht. Die Gabe von Selen und L-Carnithin konnte die oxidative Wirkung der 2,45-GHz-Strahlung reduzieren. **Meena et al. (2014)** untersuchten an männlichen Ratten, ob Melatonin eine schützende Wirkung hat, wenn die Tiere mit 2,45 GHz bestrahlt werden (2 Stunden täglich mit  $0,21 \text{ mW/cm}^2$ , SAR  $0,14 \text{ W/kg}$ , 45 Tage). Durch die Strahlung entstand eine sehr hohe ROS-Produktion im Hodengewebe, Melatonin verringerte die ROS-Gehalte. In den Spermienzellen waren DNA-Strangbrüche und Apoptoserate nach 2,45-GHz-Bestrahlung sehr hoch und wurden durch Melatoningabe reduziert, wenn auch signifikant über den Kontrollwerten. Die Testosterongehalte im Hoden waren durch die Strahlung signifikant geringer, unter Melatonin signifikant höher. Im Mikroskop (Auswertung im Blindverfahren) sah man in den bestrahlten Geweben desorganisierte Samenkanälchen

und Entzündungen in den Hodenzellen, die durch Melatonin verhindert wurden. Die unbestrahlten Kontrollen zeigten normale Keim- und Sertoli-Zellen mit normalem Entwicklungszyklus. Auch die Änderungen der Enzyme Laktatdehydrogenase-Isoenzym (LDH-X) und Xanthinoxidase (XO) im Hoden, von Lipidperoxidation und Proteinoxidation waren durch Melatonin verringert. Der oxidative Stress im Hodengewebe erzeugt DNA-Schäden und beeinflusst die Entwicklung der Spermien. Die Autoren überlegen, ob die Mikrowellen einen Einfluss auf die Polarisation der Zellmembranen haben könnten und dass Melatonin z.T. auf die Xanthinoxidase einwirkt, deren Aktivität durch die Strahlung signifikant erhöht wurde. Melatonin könnte therapeutisch eingesetzt werden. Auch [Oksay et al. \(2014\)](#) stellten im Hodengewebe von Ratten fest, dass oxidative Schädigung durch 2,45 GHz unter Gabe von Melatonin vermindert werden kann nach Bestrahlung mit 1 mW/m<sup>2</sup> (1 Stunde pro Tag, 30 Tage lang, Puls 217 Hz, 10 V/m, SAR ca. 0,143 W/kg). Melatonin ist ein effizienter Radikalfänger, der den Hoden vor Lipidperoxidation schützt, wenn 2,45-GHz-Strahlung oxidative Schäden im Hodengewebe von Ratten hervorruft. [Salah et al. \(2013\)](#) untersuchten an Ratten die Wirkung von Olivenblatt-Extrakten (tägliche Verabreichung während der Bestrahlung) auf Störungen des Zuckerstoffwechsels und oxidativen Stress in Leber und Nieren, die durch WLAN-Signale verursacht werden (2,45 GHz 1 Stunde/Tag 21 Tage lang). Die Käfige wurden unter einen Access Point eines WLAN-Gerätes gestellt. Gemessen wurden MDA, die Enzyme GPx, Katalase, SOD und der Thiolgruppengehalt, Gewebeveränderungen, Gesamtprotein im Plasma, Cholesteroll, Triglyceride, Alanin-Transaminase (ALT), Aspartat-Transaminase (AST), Harnsäure, Kreatinin und Eisengehalt. Die Bestrahlung erzeugte Diabetes-artige Bedingungen und fast alle im Blutplasma gemessenen Parameter waren signifikant verändert. Der Olivenextrakt verhinderte Störungen des Glucosestoffwechsels und stellte die Aktivitäten der Enzyme GPx, Katalase und SOD und den Thiolgruppen-Gehalt in Leber und Nieren wieder her. Die nach Bestrahlung erhöhten MDA-Gehalte in der Leber, aber nicht in Nieren, wurden durch den Olivenblätter-Extrakt vermindert. D.h. der Olivenblätter-Extrakt verminderte den oxidativen Stress und damit die Störung des Glucosestoffwechsels. Die histologische Untersuchung ergab geschädigte Leberzellen nach Bestrahlung, die Schädigungen waren durch den Olivenextrakt vermindert. Die Daten zeigen, dass sub-chronische Bestrahlung mit 2,45 GHz Stoffwechselstörungen hervorruft, besonders im Zuckerstoffwechsel; der Extrakt der Olivenblätter verbesserte den Glucosestoffwechsel und minimierte die schädliche Wirkung der oxidativen Reaktion auf die Strahlung. [Tök, Naziroğlu \(2014\)](#) hatten die Wirkung von Melatonin auf Bestrahlung der Augenlinsen mit 2,45 GHz (217 Hz gepulst, eine Stunde täglich 1 mW/m<sup>2</sup> 30 Tage, 11 V/m, entspricht etwa 0,1 W/kg Ganzkörper-SAR) an männlichen Ratten getestet. Man fand heraus, dass die oxidativen Parameter (Lipidperoxidation, GSH, GSH-Px-Aktivität) im Homogenat der Linsen z.T. signifikant, z.T. nicht-signifikant verändert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass WLAN-Strahlung in den Augenlinsen die Lipidperoxidation nicht-signifikant erhöhte, Melatonin zu signifikanter Abnahme führte. Die GSH-Px-Aktivität war

signifikant verringert bei Bestrahlung und die Melatoningabe steigerte die Aktivität signifikant gegenüber den Kontrollen. GSH war nicht-signifikant verringert nach Bestrahlung, Melatoninzusatz erhöhte die GSH-Konzentration signifikant gegenüber der WLAN-Gruppe.

## 7. Wirkungen auf den Zellzyklus

[Cleary et al. \(1996\)](#) wollten wissen, ob kontinuierliche Strahlung von 2,45 GHz und 27 MHz einen nicht-thermischen Einfluss auf den Zellzyklus hat. Dafür bestrahlten sie synchronisierte Hamster-Eierstock-Zellen (2 Stunden SAR 5 und 25 W/kg). In den Zellkulturen wurden Zellzyklus, -teilung und -wachstum von 2 Stunden bis zu 4 Tage nach der Bestrahlung untersucht. Es zeigte sich, dass die beiden Frequenzen unterschiedliche Auswirkungen hatten: Die 2,45 GHz bewirkten Änderungen aller Phasen des Zellzyklus und hatten eine doppelt so starke Wirkung wie 27 MHz bei gleichen Temperaturverhältnissen (37 °C). [Ballardin et al. \(2011\)](#) untersuchten an der Hamster-Zelllinie V79 die nicht-thermischen Auswirkungen von 2,45 GHz (5 und 10 mW/cm<sup>2</sup>) auf Zellteilung (speziell den Spindelapparat) und Überlebensrate. Neben der Bestrahlung wurden Zellen normaler Erwärmung unterzogen (15 Minuten 38–41 °C). Die Bestrahlung zeigte signifikant mehr Zellen mit defektem Spindelapparat, stärker bei 10 als bei 5 mW/cm<sup>2</sup> im Vergleich zur Kontrolle. Die Zellen mit Apoptose waren signifikant erhöht bei beiden Feldstärken. Die Temperatur hatte bis 41 °C keine Auswirkungen auf die korrekte Funktion (assembly) des Spindelapparates, die Apoptoserate war erhöht bei 40 und 41 °C. Man kann daraus schließen, dass die Änderungen durch die Strahlung an sich trotz der sehr kurzen Bestrahlungszeit, und nicht durch thermische Wirkung hervorgerufen werden. Die Forscher nehmen an, dass kurzzeitige Bestrahlung mit der Resonanzfrequenz von Wasser\* bei V79-Zellen reversible Veränderungen des Spindelapparates verursacht und die Zellen kehren zum normalen Zellzyklus zurück, während längere Einwirkzeit irreversibel sein könnte.

## 8. Auswirkungen auf die Leber

[Holovska et al. \(2015\)](#) untersuchten Ratten-Lebern auf strukturelle und ultrastrukturelle Veränderungen nach Bestrahlung mit 2,45 GHz (3 Stunden pro Tag 3 Wochen lang, Leistungsflussdichte 2,8 mW/cm<sup>2</sup>) im Licht- und Elektronenmikroskop. Man sah bei den bestrahlten Lebern mehr Blut in den Gefäßen, sporadisch nekrotisierte Leberzellen, Weiterung der Leber-Sinusoide, die Zellkerne waren irregulär und enthielten kondensiertes Chromatin. Einige Leberläppchen zeigten kleine Entzündungsherde. Das Elektronenmikroskop zeigte veränderte Membranstrukturen, z.T. zweikernige Zellen, signifikant mehr Vesikel in den Zellen, unregelmäßig geformte Zellkerne und signifikant mehr Lipidtropfen verschiedener Größe. Die Strahlung kann somit schädliche Auswirkungen auf Leberzellen von Ratten haben. [Kumari et al. \(2012\)](#) untersuchten antioxidative Enzyme und Leber-Funktionstests an erwachsenen männlichen Ratten, neben 900 MHz auch



2,45-GHz-Bestrahlung, die mit einem Mikrowellenherd erfolgten (2 Stunden/Tag 35 Tage lang mit 0,22 mW/cm<sup>2</sup>, Ganzkörper-SAR 0,15 W/kg). Im Lebergewebe wurden nach der Bestrahlung viele Parameter untersucht: die Aktivitäten der antioxidativen Enzyme GSH-Px, SOD und Katalase, die Lipidperoxidation (MDA) zur Bestimmung der Zellmembranschädigung und zur Leberfunktionsprüfung Gesamt-Bilirubin (TBIL), Alkalische Phosphatase (ALP), Alanin-Transaminase (ALT) und Aspartat-Transaminase (AST) sowie Gesamtprotein, Albumin und Globulin. Man hat festgestellt, dass eine geringe Erhöhung von ROS zu erhöhter Aktivität der antioxidativen Enzyme führt, während hohe Konzentrationen die Enzyme hemmen, sodass sie ihre Schutzfunktion gegen ROS nicht mehr ausführen können. Die antioxidative Aktivität und die Hemmung der ROS-Erzeugung sind wichtig zum Schutz der Leber vor strahleninduzierten Schäden. Die 2,45 GHz-Strahlung erzeugte signifikant reduzierte GSH-Px ( $13,33 \pm 0,69$  zu  $22,12 \pm 0,82$  nmol/min/ml), ähnlich die Leber-SOD-Aktivität ( $32,50 \pm 1,52$  zu  $52,31 \pm 1,52$  U/ml), während die Leber-Katalase signifikant erhöht war ( $24,74 \pm 2,31$  zu  $17,73 \pm 2,42$  nmol/min/ml). Die MDA-Konzentration als Indikator für Zellmembranschädigung war signifikant erhöht ( $3,92 \pm 0,44$  zu  $1,87 \pm 0,55$  nmol/min/ml). Die Konzentrationen von TBIL, ALT, AST und ALP waren signifikant höher als bei der Kontrolle. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch die 2,45-GHz-Strahlung eine Überproduktion von freien Radikalen erfolgt, was zur Hemmung der antioxidativen Enzyme und folglich zu oxidativem Stress in der Leber und zu Schäden in Zellen, Geweben und Organen führt. Ähnliche Ergebnisse wurden bei 900 MHz gefunden.

## 9. Auswirkungen auf die Schilddrüse

Misa-Agustiño et al. (2012) fanden heraus, dass die Hitzeschockproteine HSP70 und HSP90 durch 2,45-GHz-Strahlung unterhalb der thermischen Schwelle nach 90 Minuten und 24 Stunden (durchschnittliche SAR-Werte von 0,046, 0,104 und 0,482 W/kg in der Schilddrüse bzw. Ganzkörperwerte von 0,0169, 0,0364 und 0,161 W/kg) verändert werden. Sie untersuchten die Schilddrüsen von Ratten und stellten fest, dass an den Zellen keine Schäden zu sehen waren und dass Konzentrationen der HSPs nach 90 Minuten signifikant vermindert waren, aber keine Apoptosemechanismen (Chromatin-Kondensation, Zellkern-Fragmentierung) eingeleitet wurden. Nach 24 Stunden waren die HSP-Konzentrationen wieder erhöht, blieben aber unter den Kontrollwerten. Die 2,45-GHz-Strahlung erzeugte Stress in den Zellen der Schilddrüse, jedoch ohne Apoptose im Schilddrüsengewebe einzuleiten. Misa-Agustino et al. (2015) erforschten an Thymuszellen von Ratten die Wirkung von 2,45-GHz-Strahlung ähnlich wie vorher (durchschnittliche SAR-Werte im Thymus 0,046, 0,104 und 0,482 W/kg, Ganzkörperwert 0,0169, 0,0364 und 0,161 W/kg) für 1,5, 3,0 und 12 W 30 Minuten lang. 90 Minuten nach der Bestrahlung wurden in Thymusgewebe und Zellextrakten Proteinkonzentration, HSP90-, HSP70- und GR-Gehalte (Glucocorticoid-Rezeptoren) bestimmt und morphologische Veränderungen untersucht. Im Mikroskop sah man viele Veränderungen, Erhöhung der

Permeabilität des Endothels (man sah rote Blutkörperchen außerhalb der Gefäße), Neubildung von Gefäßen, signifikant mehr retikuläre Epithelzellen und rote Blutkörperchen und die Zahl der Glucocorticoid-Rezeptoren (GR) in der Thymusrinde der bestrahlten Tiere war erhöht. Außerdem war der Gehalt an HSP90 geringer, in einer Probe HSP70 erhöht. Die Veränderungen deuten auf Zellstress und Beeinträchtigung der Immunantwort sowie der Reifung und Apoptose im Schilddrüsengewebe und Entwicklung der Thymozyten durch die Strahlung hin. Die veränderten HSP-Gehalte bedeuten, dass die Funktionen bei Apoptose und Immunreaktionen nicht richtig reguliert werden. Sinha (2008) hat neben dem veränderten Verhalten der Ratten und des EEGs durch 2,45 GHz auch Beeinträchtigungen der Schilddrüsenhormone (TSH, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>) gefunden. Die nicht-thermische Bestrahlung ( $16,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  für 21 Tage 2 Stunden/Tag) bewirkte eine Erhöhung des Wassergehalts um 2,1 % im Gehirn, das führte zur Schwellung um 6,97 %. Parallel zu den signifikanten Verhaltensänderungen (stärkere Bewegungsaktivität u.a.) war T<sub>3</sub> im Blut signifikant verringert am 16. und 21. Tag, T<sub>4</sub> signifikant erhöht am 21. Tag, die TSH-Konzentration war nicht-signifikant verändert gegenüber der Kontrolle. Die niedrigen Feldstärken könnten schädlich sein, sie reichen aus, um die Schilddrüsenhormone und die Reaktionen der Tiere zu verändern. Es könnte ein Zusammenhang zwischen den Hormon- und Verhaltensänderungen bestehen, denn die Schilddrüsenhormone wirken mit anderen Neurohormonsystemen und Neurotransmittern zusammen. Das Verhalten der bestrahlten Tiere unterschied sich signifikant von dem der unbestrahlten: Die bestrahlten Tiere erwiesen sich als hyperaktiv.

## 10. Auswirkungen auf die Genexpression

Lee et al. (2005) stellten fest, dass gepulste 2,45-GHz-Strahlung eines Magnetron-Gerätes (10 W/kg, Pulse 133 W/kg für 155 µsec, 320 V/m) nach 2 und 6 Stunden Bestrahlung die Genexpression in menschlichen Zellkulturen von HL-60-Zellen (Promyelozyten-Leukämie-Zelllinie) verändert. Die Genexpression von 221 Genen war nach 2 h verändert (frühe Gene), nach 6 h waren 896 Gene betroffen, davon 742 bekannte und 154 unbekannt. Darunter waren Gene für Apoptose (6), Stoffwechsel, Polysaccharid-Biosynthese, RNA-Funktionen und Translation hochreguliert worden; herunterreguliert waren Gene für Transport, Stoffwechsel, RNA-Funktionen und Zellzyklus (23). Genexpression von Hitzeschock-Proteinen war insgesamt nicht signifikant gestiegen, wenn auch einige Gene signifikant verändert waren. Die Ergebnisse zeigen, dass die 2,45-GHz-Strahlung die Genexpression über nicht-thermische Mechanismen in den Zellkulturen verändert.

## 11. Auswirkungen auf die Zellmembran

Die in den Scientific Reports (Hrsg. Nature-Gruppe) veröffentlichte Studie von Panagopoulos et al. (2015) stellt die Hypothese auf, dass die Polarisierung, also die feste Schwingungsrichtung des elektrischen Feldvektors der Welle, ein

entscheidender Faktor für das Verständnis von biologischen Wirkungen elektromagnetischer Strahlung niedriger Intensität ist. Da die Polarisation, ebenso wie die Pulsung der Mikrowellenstrahlung, eine leistungsunabhängige Eigenschaft ist, wirkt die durch sie bedingte Schädigung auch bei geringster Strahlenbelastung. Die Studie von Panagopoulos et al. ergab, dass die WLAN-Frequenz bei einer „niedrigen“ Strahlungsbelastung von  $8.000 \mu\text{Watt}/\text{m}^2$  bereits nach 4,8 Minuten Einwirkung zu irregulären Reaktionen auch der Ionenkanäle an der Zellmembran führen kann, verursacht durch die Polarisation der Strahlung. Die Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ )-Homöostase ist einer der wichtigsten Faktoren für die physiologische Funktion von Zellen, denn sie ist beteiligt an Zellwachstum, Signalübertragungen und Apoptose. Sie wird reguliert durch Ionenkanäle in den Zellmembranen. [Naziroğlu et al. \(2012a\)](#) fanden im Hirngewebe von männlichen Ratten (im Doppelblindverfahren) heraus, dass Melatonin über Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ )-Ionenkanäle eingreift und reguliert, wenn gepulste 2,45-GHz-Strahlung ( $1 \text{ mW}/\text{m}^2$ , SAR 0,1434) oxidativen Stress in Nervenzellen erzeugt und der  $\text{Ca}^{2+}$ -Einstrom erhöht wird. Beteiligt sind spannungsabhängige und TRPM2-Calciumkanäle. Das heißt, die Strahlung von WLAN-Geräten bewirkt oxidative Schädigung über Calciumkanäle und  $\text{Ca}^{2+}$ -Anstieg in der Zelle. Melatonin schützt das Hirngewebe vor Schäden durch Abwehr des oxidativen Stresses. [Naziroğlu/Cig et al. \(2012b\)](#) untersuchten die Wirkung eines WLAN-Gerätes (2,45 GHz gepulst, 0,1–2,5 W/kg für 1, 2, 12 oder 24 Stunden) auf oxidativen Stress und Calcium $^{2+}$ -Einstrom in menschlichen Leukämiezellen. Die Strahlung des Gerätes rief oxidativen Stress und gesteigertes Zellwachstum durch signifikant erhöhten  $\text{Ca}^{2+}$ -Einstrom in das Zytoplasma der menschlichen Leukämie-Krebszellen hervor, schlussfolgern die Forscher (siehe dazu auch CIG (2015), Naziroğlu (2012c)).

## 12. Auswirkungen auf Bakterien

Es gibt nur wenige Arbeiten zum jetzigen Zeitpunkt, die die Wirkung der 2,45-GHz-Strahlung auf Bakterien untersucht haben. [Taheri und Mitarbeiter](#) haben [2015 und 2017](#) die Bakterienstämme *Listeria monocytogenes*, *E. coli* und *Klebsiella pneumoniae* auf die Antibiotika-Resistenz nach Bestrahlung untersucht. Sie stellten fest, dass die Resistenz durch die Bestrahlung erhöht wird. Im Jahr 2015 untersuchten die Forscher die Reaktion der Klebsiellen auf 5 verschiedene Antibiotika nach Bestrahlung mit 2,45 GHz eines WLAN-Routers (1 W) im Abstand von 5 cm bis zu 8 Stunden nach Bestrahlung. Bis 4,5 Stunden stieg die Empfindlichkeit der Bakterien gegenüber der Strahlung an, danach lässt die Empfindlichkeit nach, d.h. es beginnt die Resistenzentwicklung. Die Forscher führen das darauf zurück, dass die Bakterien eine bestimmte Schädigungshöhe erreichen müssen, um mit Abwehr – hier mit Resistenz gegen alle 5 Antibiotika – zu reagieren. Dies erfolgt auf eine nicht-lineare Weise. Das heißt, es gibt hier einen sogenannten Fenster-Effekt. Der besagt, dass bestimmte Bedingungen (Frequenz, Dosis usw.) eine signifikante Wirkung haben und niedrigere oder höhere nicht. Da alle hier verwendeten Antibiotika die Zellwand der Bakterien angreifen, könnten die Zellwände durch die Strahlung

durchlässiger werden und Moleküle können durch Kanäle hindurchgehen, was z.B. zu Antibiotika-Therapien genutzt werden könnte. In der Arbeit von 2017 waren bei *Listeria monocytogenes* und *E. coli* signifikant stärkeres Wachstum und signifikant erhöhte Antibiotika-Resistenzen gegenüber 6 Antibiotika beobachtet worden nach Bestrahlung mit 900 und 2.450 MHz (normaler WLAN-Router 2,45 GHz, SAR 0,13 W/kg in 14 cm Abstand zur Bakteriensuspension). Die bestrahlten Zellen wuchsen schneller und bei den *Listerien* war die Zelldichte am Ende höher als bei den Kontrollen. Die Resistenz entwickelte sich bei *E. coli* bei allen 6 Antibiotika, bei den *Listerien* war nur bei einem Antibiotikum ein signifikanter Unterschied zur Kontrolle zu sehen. Unterschiedliche Frequenzen rufen demnach unterschiedliche Reaktionen hervor. Die Bestrahlung mit Mikrowellen von 900 und 2,45 GHz hat Einfluss auf Ionenkanäle, Membranen, DNA-Reparatursysteme und wahrscheinlich auch auf Ionenpumpen in den Membranen. Diese Ergebnisse geben Anlass zur Sorge, da diese Entwicklung eine potenzielle Bedrohung für die Gesundheit bedeuten kann.

## 13. Einflüsse auf Pflanzen

[Chen et al. \(2009\)](#) setzten Weizensamen (*Triticum aestivum*) Salzstress und 2,45-GHz-Strahlung zur Verbesserung des Ertrags aus. Weizen wächst schlecht unter Salzstress, da die Bildung von reaktiven oxidativen Substanzen (ROS) gesteigert wird mit der Folge von Zellschäden. Diese Zellschäden bekämpft die Pflanze mit Abwehrmechanismen, u.a. mit Steigerung der antioxidativen Enzyme Glutathionreductase (GR), Superoxid-Dismutase (SOD), Katalase (CAT) und Peroxidasen (POD), NO-Synthase, zudem mit nicht-enzymatischen Substanzen wie Glutathion, Ascorbinsäure (Vitamin C), Prolin, Stickstoff-Monoxid (NO) und anderen Reaktionen. Die Feldstärke betrug  $126 \text{ mW}/\text{cm}^2$  in der Mitte, die 0, 5, 10, 15, 20 oder 25 s auf die Samen einwirkte, unterteilt in 4 Gruppen: unbestrahlte Kontrolle, bestrahlte Gruppe, dazu Salzstress mit und ohne Bestrahlung. Gemessen wurden Länge der Wurzeln und des Sprosses, MDA, in Blättern die Enzyme SOD, POD, CAT, GR, Protein-Konzentration, oxidiertes und reduziertes Glutathion, NOS und NO. Die Mikrowellen verursachten signifikanten Anstieg der Wurzel- und Sprosslänge 3 Tage nach der Behandlung außer bei 25 s. Am besten war die Wirkung bei 10 s, deshalb wurde diese Zeit im weiteren Verlauf angewendet. Die Enzym-Aktivitäten waren am niedrigsten in der Salzstress-Gruppe, am höchsten in der Mikrowellen-Gruppe (signifikant zur Kontrollgruppe). Die Forscher schlussfolgern, dass die ROS-induzierte Abnahme der Spross- und Wurzellänge unter Salzstress durch Behandlung der Samen verbessert werden kann. Die Mikrowellen erhöhen die Toleranz der Weizensamen gegen Salzstress durch Stimulation des antioxidativen Abwehrsystems durch Produktion von NO und enzymatischen und nicht-enzymatischen Antioxidantien. Das könnte in der Landwirtschaft einen Vorteil bringen, um Ernteeinbußen zu verringern. [Soran et al. \(2014\)](#) fanden heraus, dass Kräuter- oder Gewürzpflanzen, die teilweise auch Heilpflanzen sind, Stressreaktionen auf die Bestrahlung zeigen. 3 Wochen nach der

Einsaat konnten nach 3-wöchiger Bestrahlung mit 900 MHz eines Mobiltelefon-ähnlichen Generators (100 mW/m<sup>2</sup>) oder 2,45 GHz eines WLAN-Routers (70 mW/m<sup>2</sup>) in Petersilie (*Petroselinum crispum*), Sellerie (*Apium graveolens*) und Dill (*Anethum graveolens*) viele Veränderungen nachgewiesen werden. Grundsätzlich bilden die Pflanzen aromatische Öle, um Krankheitserreger und Fressfeinde abzuschrecken, wobei der Gehalt stark von den Umweltbedingungen abhängt. Untersucht wurden hier im Elektronenmikroskop (Zellwand, Chloroplasten, Mitochondrien), Photosynthese und Assimilation. Der Wassertransport war in allen Fällen signifikant, bei WLAN am stärksten verringert. Die aromatischen Öle und die flüchtigen Stoffe in den Blättern (Duftstoffe) wurden vermehrt ausgeschieden, vor allem Monoterpene. Zellwanddicke, Chloroplastenlänge, Mitochondriengröße waren drastisch geringer bei WLAN (z.B. Anethum, Kontrolle 1,57 µm, 900 MHz 0,55 µm, WLAN 0,25 µm). WLAN-Strahlung führte zu einer Verminderung der ätherischen Ölkonzentration. Es gab einen direkten Zusammenhang zwischen strukturellen und chemischen Änderungen in den 3 Pflanzenarten. Die Schlussfolgerungen: Mikrowellen erzeugen Stress in den Pflanzen, deshalb steigert die Pflanze die Abgabe der Duftstoffe und Terpene, der Ölgehalt und die Blattanatomie werden geändert. WLAN-Strahlung erzeugt mehr Stress als die 900-MHz-Strahlung.

#### 14. Studien, die „keine Wirkungen“ gefunden haben

Fragen werfen Zell-Experimente mit sehr bis extrem hohen Feldstärken von 50 bis 200 W/kg auf, bei denen oft keine Wirkung gefunden wird, d.h. keine Unterschiede zwischen bestrahlten und scheinbestrahlten Kontrollen zu sehen sind oder die Veränderungen als thermische Wirkungen beurteilt werden (beispielsweise Wang et al. 2005, 2006, Takashima et al. 2006, Komatsubara et al. 2005, Fortune et al. 2010). Außer Fortune gehören alle einer Arbeitsgruppe an mit den Mitgliedern Komatsubara Y, Hirose H, Sakurai T, Koyama S, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J, Takashima Y, Wang J. Da solche hohen Feldstärken im normalen Leben nicht vorkommen stellt sich die Frage, welchen Sinn solche Experimente haben. Eine wissenschaftlich zu klärende Frage ist, welches Phänomen bzw. welche Mechanismen zugrunde liegen, wenn die extrem hohen SAR keine Veränderungen hervorrufen, aber in bestimmten Fällen anscheinend auch nicht zum Absterben der Zellen führen. In verschiedenen Arbeiten wird darauf hingewiesen, dass geringe bis sehr geringe Feldstärken Wirkungen haben, höhere dagegen nicht. Das gilt nicht nur für Arbeiten zu 2,45 GHz, sondern auch für andere Frequenzen, wo man schon lange von Fenster-Effekten spricht. Von Industrieseite und Behörden wird zum Beweis der Unbedenklichkeit der WLAN-Nutzung häufig die Studie von Foster und Moulder (2013) ins Feld geführt. Im Auftrag der Mobilfunkindustrie erstellten sie 2013 einen Überblick über den Stand wissenschaftlicher Arbeiten zur WLAN-Strahlung. Nach ausführlicher Darlegung der Technik wird zu den Gesundheitsrisiken behauptet, es gäbe einen „überwältigenden Konsens“ in den Überblicksarbeiten, dass keine gesundheitlichen Schäden unterhalb der Grenzwerte existieren. Sie beziehen

sich auf die angeblich einzige bekannte und anerkannte, die thermische Wirkung, trotz der Tatsache, dass die IARC 2011 eine mögliche Krebserregende Wirkung festgestellt hat. Foster und Moulder legen Kriterien fest, was nach ihrer Ansicht brauchbare bzw. unbrauchbare Studien für die Beurteilung der gesundheitlichen Relevanz sind. In Tabelle 4 ihrer Arbeit sind 7 brauchbare Studien, die von 2 Arbeitsgruppen (2 von einer italienischen, 5 von einer französischen) erstellt worden waren und die keine Wirkungen gefunden haben. In der Tabelle 4 sind Arbeiten von Arbeitsgruppen aufgeführt, die selten oder nie Wirkungen finden, fast ein Who-is-Who der „No effect“-Arbeitsgruppen. Diese Studien wurden z.T. von der Industrie bezahlt bzw. Mitarbeiter sind mit der Industrie assoziiert (z.B. mit dem Telekommunikationsunternehmen Orange). In Tabelle 5 sind 6 ihrer Meinung nach schwache Studien mit Wirkungen aufgelistet. Es wird argumentiert, die schwachen Studien hätten keine geeigneten Kontrollen, alle hätten andere Bedingungen, keine positiven Kontrollen (die 4 der 7 „guten“ Arbeiten in Tabelle 4 auch nicht haben) und man könne deshalb keine Vergleiche ziehen. Davon abgesehen erwecken diese beiden kleinen Tabellen den Anschein, als gebe es bis 2013 nur diese wenigen Studien, obwohl am Ende 71 Literaturstellen zitiert sind, von denen allerdings viele nichts mit WLAN-Strahlung zu tun haben. Foster schreibt 2013 einen Beitrag im IEEE Microwave Magazine, in dem er die Technik erklärt und die Geräte aufzählt (Mikrowellenherd, Telefone, Bluetooth, Smartmeter usw.). Sie seien gesundheitlich unbedenklich, weil sie alle mit geringen Feldstärken weit unterhalb der Grenzwerte arbeiten. Foster behauptet, dass es keine biologischen Mechanismen gäbe, und es deshalb schwer sei, ein Forschungsprogramm zu entwickeln. Das ist eine der üblichen Redewendungen, um Risiken, die in den Bereichen unterhalb der Grenzwerte nachgewiesen sind, auszublenden. Die Arbeit wurde unterstützt von der Federal Communications Commission (FCC) und dem Electric Power Research Institute (EPRI). Foster und Moulder fragen 2015 in einem Kommentar, ob Wi-Fi Hirnfunktionen beeinflussen kann und geben 9 Literaturzitate an. Davon beziehen sich 3 auf WLAN-Frequenzen, die anderen 5 auf Mobilfunk, die 9. ist Fosters oben erwähnte Erklärung der Technik und seine Meinung (2013) zu Gesundheitsrisiken. Arbeiten, die von der Industrie oder ähnlichen Interessenvertretern bezahlt wurden und die angeblich „keine Wirkung von WLAN“ finden, sind problematisch. Die Ergebnisse von drittmittelfinanzierten Studien hängen oft von den Interessen der Finanzgeber ab, wie Untersuchungen von Blank (2014), Huss et al. (2007), Prasad et al. (2017) und Slesin (2006) belegen. Auch sind negative Forschungsergebnisse nicht in der Lage, positive Befunde von korrekt durchgeführten Studien zu widerlegen. Sie sind kein Beweis dafür, dass die positiven Erstbefunde falsch sind.

#### 15. Diskussion und Schlussfolgerungen

Diese Übersicht zeigt, dass Wirkungen der 2,45-GHz-Strahlung wiederholt von verschiedenen Forschergruppen gefunden werden, an verschiedenen Untersuchungsobjekten und mit verschiedenen Feldstärken. Es gibt ein weites

Spektrum an Untersuchungsgegenständen, darunter auch die Auswirkungen von 2,45-GHz-Strahlung eines WLAN-Routers auf Quecksilberausscheidungen aus Amalgamfüllungen: Es wurden signifikant erhöhte Werte gefunden (Paknahad et al. 2016).

Bisher gibt es wenige Langzeitstudien, wenige am Menschen und noch keine epidemiologischen Untersuchungen, wenn man von den Studien zu Laptops mit kleinen Teilnehmerzahlen absieht. Dafür ist es auch noch zu früh, um verlässliche Zahlen zu bekommen. Aber man hat Hinweise, dass vor allem Neugeborene, Kinder oder Jugendliche besonders empfindlich sind, wie insbesondere die Arbeitsgruppen von Naziroğlu, Atasoy, Margaritis/Panagopoulos, Orendacova, Othmann, Özorak, Sangün, Shahin und Yüksel herausgearbeitet haben. Die Experimente wurden mit Ratten oder Mäusen durchgeführt, zum Teil als Langzeitstudie (bis 1 Jahr). Dabei muss man bedenken, dass die im Labor eingesetzten Ratten und Mäuse eine Lebenserwartung von vielleicht 2 Jahren haben. Man kann daraus zumindest ableiten, dass menschliche Kinder und Jugendliche vor möglichen erhöhten Risiken geschützt werden müssen. In der Studie von Margaritis et al. (2014) wird darauf hingewiesen, dass die Strahlung von Bluetooth (0,3 V/m) und WLAN-Routern (hier 2,1 V/m) stärkere Wirkungen zeigte als Mobilfunkstrahlung mit sehr viel höheren Feldstärken. Möglicherweise deckt sich das mit den Ergebnissen der Arbeiten von L. von Klitzing, dass die leistungsunabhängige Taktung mit 10 Hz (Puls 1 ms) von WLAN-Routern Reaktionen hervorruft. Kumari et al. haben 2012 in ihrer Arbeit gesehen, dass höhere ROS-Gehalte in der Leber die antioxidativen Enzyme hemmen, geringe eine Steigerung bewirken. Hier könnte ein Schlüssel für weitere Mechanismen liegen, wie oder ob Gewebeschäden auftreten oder auch nicht. Ebenso sollte die Polarisation der Strahlung (Meena et al. 2014, Panagopoulos et al. 2015) weitere Aufmerksamkeit bekommen.

Diese Arbeit stellt die Ergebnisse von über 100 Studien dar, die in seriösen Fachzeitschriften veröffentlicht wurden. Die meisten Studien bestätigen ein Schädigungspotential, wie es in der gemeinsamen „Erklärung von Nikosia“ der Zypri-schen und Österreichischen Ärztekammern von 2017 zusammengefasst wird: „Zu den möglichen gesundheitlichen Auswirkungen nicht-ionisierender Strahlung von EMF/RF (elektromagnetischen Feldern/hochfrequenter Strahlung) von 30 KHz–300 GHz gehören Kanzerogenität (Gruppe 2B, IARC 2011), Entwicklungsneurotoxizität, Auswirkungen auf die DNA, die Fruchtbarkeit, Überempfindlichkeit und andere schwerwiegende Wirkungen. Diese sind in wissenschaftlich überprüften Studien gut dokumentiert. Hochfrequenzstrahlung kann oxidativen Stress in Zellen erhöhen und zu einer Zunahme entzündungsfördernder Zytokine führen sowie zu einer Verringerung der Fähigkeit, Einfach- und Doppelstrangbrüche der DNA zu reparieren. Kognitive Beeinträchtigungen beim Lernen und dem Gedächtnis wurden auch aufgezeigt. Diese Auswirkungen können bei Intensitäten auftreten, die weit unterhalb bestehender Grenzwerte der ICNIRP liegen ... Die Exposition gegenüber EMF/RF in einem frühen Entwicklungsstadium ist ein Grund besonderer Besorgnis. In dieser

Phase nimmt nämlich der Körper mehr Strahlung auf, es kann Auswirkungen auf das sich entwickelnde Gehirn, Nervensystem und Fortpflanzungssystem geben. Es können beispielsweise Krebs oder Folgen für die Kognition ausgelöst werden.“ (<https://www.diagnose-funk.org/publikationen/artikel/detail&newsid=1242>)

Das Schädigungspotential von WLAN, auch bei geringer Strahlungsstärke, kann nicht mehr angezweifelt oder relativiert werden, auch nicht durch die Studien, die keine Wirkungen gefunden haben. Die Entscheidungsträger in der Politik, den Schul- und Gesundheitsbehörden sind in der Verantwortung, sich mit der Studienlage auseinanderzusetzen und sich nicht von den Argumentationen der Industrielobby oder Textbausteinen von Regierungsinstitutionen täuschen zu lassen. Die Gesundheitsrisiken sind vorhanden. Besonders wichtig wäre es, weitere Untersuchungen zu Wirkungen auf das Gehirn und auf junge Menschen durchzuführen. Die Anwendung des Vorsorgeprinzips, das in allen europäischen Ländern anerkannt wird, lässt nur einen Schluss zu: Der menschliche Körper darf WLAN nicht körperlern und dauerhaft ausgesetzt werden. Es ist kein Zufall, dass in der Bedienungsanleitung des Telekom-WLAN-Routers steht: „Die integrierten Antennen Ihres Speedport senden und empfangen Funksignale bspw. für die Bereitstellung Ihres WLAN. Vermeiden Sie das Aufstellen Ihres Speedport in unmittelbarer Nähe zu Schlaf-, Kinder- und Aufenthaltsräumen, um die Belastung durch elektromagnetische Felder so gering wie möglich zu halten.“ Die Zypri-sche und Österreichische Ärztekammern fordern in ihrem gemeinsamen Appell zu WLAN, die Entscheidungsträger müssten „eine altersgerechte, vernünftige Nutzung digitaler Technik fördern und dürfen kabellose Netzwerke an Schulen und insbesondere an Vorschulen, Kindergärten und Grundschulen nicht erlauben. Stattdessen sind kabelgebundene Verbindungen einzusetzen.“ (ebda.) Der Gesetzgeber ist gefordert, die Schutzgesetzgebung dem Stand der Wissenschaft anzupassen und die Erforschung von Alternativen zu WLAN, wie sie z.B. mit der VLC-Technologie (Visible Light Communication, Li-Fi) vorliegt, zu fördern.

#### Autorin:

Dipl.-Biol. Isabel Wilke, Redaktion Strahlentelex/ElektromogReport  
E-Mail: emf@katalyse.de

#### Interessenskonflikt:

Die Autorin erklärt, dass keine Interessenskonflikte bestehen.

#### Copyright:

Sämtliche Rechte liegen bei Diagnose-Funk e.V. Veröffentlichungen auf Homepages und in anderen Medien sind erwünscht, Bedingung ist die Genehmigung durch Diagnose-Funk e.V. Anfragen: kontakt@diagnose-funk.org, www.diagnose-funk.org, www.EMFData.org

#### Publikation:

Beilage in umwelt · medizin · gesellschaft 1-2018; Zitierweise: Wilke I (2018): Biologische und pathologische Wirkungen der Strahlung von 2,45 GHz auf Zellen, Fruchtbarkeit, Gehirn und Verhalten. Review: umwelt · medizin · gesellschaft 2018 Feb 31(1)

Forum Medizin Verlagsgesellschaft mbH  
Gutenbergstraße 8, 26135 Oldenburg  
Tel.: 0441-9365458-0, E-Mail: redaktion@forum-medizin.de  
www.forum-medizin.de

## Tabellarische Darstellung der Ergebnisse von Studien zur Frequenz 2,45 GHz

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Aggarwal et al. 2013	männliche Ratten, Schlaf-EEG, 3 Stunden $7,37 \times 10^{-4}$ mW/cm <sup>2</sup> , SAR 1,16 mW/kg; 1 Stunde/Tag für 21 Tage, 1 kHz moduliert, aufgezeichnet 9–12 Uhr	2 bestrahlte Tiere starben, Temperaturerhöhung nur 0,7 °C, nicht-thermische Wirkung EEG: in der 1. Stunde keine signifikanten EEG-Stärken-Veränderungen, in der 2. Stunde signifikant im $\beta$ -Bereich, auch in $\delta$ und $\alpha$ . Bei $\theta$ in der 2. und 3. Stunde stärkere Änderungen als im $\alpha$ - und $\delta$ -Bereich	mögliche psychopathophysiologische Störungen, evtl. BBB, synaptische Eigenschaften, Neurotransmitterkonzentration, Änderung der Synchronisation/Desynchronisation der feuernden Nervenzellen, sodass chronische Einwirkung von 2,45 GHz schädliche Auswirkungen haben kann.
Akdag et al. 2016	männliche Ratten, Langzeitbestrahlung 1 Jahr lang, Ganzkörper-SAR 141,4 $\mu$ W/kg, Maximum 7127 $\mu$ W/kg; Gehirn, Haut, Leber, Nieren, Hoden auf DNA-Schäden	Erhöhte DNA-Schädigung, signifikant im Hodengewebe	
Avendaño et al. 2012	29 gesunde Männer mit Laptop; DNA, Spermien	signifikante DNA- und Spermien-Schädigungen	
Aweda et al. 2003	Ratten, 2,45 GHz 8 Wochen 6 mW/cm <sup>2</sup> ; Lipidperoxidation, Gabe von Vitamin C und E	signifikanter Anstieg der Lipidperoxidation in 24 Stunden, fiel innerhalb einer Woche ab; Gabe der Vitamine A und C kompensiert	Die Strahlung erzeugt signifikanten oxidativen Stress, der durch Antioxidantien verhindert werden kann
Atasoy et al. 2013	im Wachstum befindliche Ratten 2437-MHz-WLAN-Gerät 24 Stunden/Tag 20 Wochen, SAR max. 0,091 W/kg; 8-Hydroxy-Deoxy-Guanosin und 8-Hydroxy-Guanosin im Blut, Hodengewebe histologisch und oxidative Parameter	zumeist signifikante Unterschiede bei Wachstum der Rattenhoden und den oxidativen Parametern	Kinder und Jugendliche könnten besonders gefährdet sein
Aynali et al. 2013	Mundschleimhaut von Ratten 2,45-GHz-Strahlung 1 Stunde/Tag, 28 Tage lang	Schleimhaut oxidative Schädigung, Lipidperoxidation signifikant erhöht, signifikant vermindert durch Gabe von Melatonin, ebenso die Aktivität der Glutathionperoxidase	
Ballardin et al. 2011	Hamster-Zelllinie V79, 2,45 GHz 5 und 10 mW/cm <sup>2</sup> , Apoptose, Zellzyklus	signifikant erhöhte Apoptoseraten, nicht-thermische Wirkung auf Spindelapparat	
Banaceur et al. 2013	3 Mäuse-Stämme, einer mit Alzheimer-Genen, Langzeiteinwirkung WLAN-Gerät 2,4 GHz 2 Stunden/Tag, 30 Tage Ganzkörper-SAR 1,6 W/kg; Hirnleistung	die Lern- und Gedächtnisleistung der Alzheimermäuse war verändert	
Cammaerts, Johansson 2014	Ameisen, WLAN-Router Minuten 600 und 800 $\mu$ W/m <sup>2</sup> Mittelwert, Notebook 300–500 $\mu$ Watt/m <sup>2</sup> mit und ohne eingeschaltete WLAN-Funktion, Abstand 20–30 cm von den Kolonien	Gestörtes Verhalten, veränderte Bewegungsmuster, nach 6–8 Stunden wieder normale Futtersuche	
Ceyhan et al. 2012	männliche Ratten, WLAN-ähnliche 2,45 GHz gepulst, 1 Stunde/Tag 4 Wochen, 64 mW/kg auf der Haut; oxidative/antioxidative Parameter (SOD, KAT, GPx, LPO), $\beta$ -Glucan zur schützenden Wirkung in der Haut gemessen	signifikant erhöhte Lipidperoxidation und Katalase-Aktivität, signifikant verminderte Aktivitäten von SOD und GSH-Px; $\beta$ -Glucan erhöhte die Katalase-Aktivität leicht und verhinderte die Abnahme der GSH-Px-Aktivität nicht-signifikant, Lipidperoxidation durch $\beta$ -Glucan signifikant niedriger, fast auf Niveau der Kontrollen	
Chaturvedi et al. 2011	Mäuse, 30 Tage 2 Stunden/Tag, 0,02564 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 0,03561 W/kg	Unterschiede in Gewicht, Aktivität, räumlichem Erinnerungsvermögen zw. bestrahlter u. unbestrahlter Gruppe. Tagesrhythmus beeinflusst, Blutbildveränderungen, DNA-Strangbrüche in Hirnzellen	

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Chauhan, Kesari et al. 2017	Ratten, 2 Stunden täglich Mikrowellenherd 35 Tage, 0,2 mW/cm <sup>2</sup> , Ganzkörper-SAR 0,14 W/kg;	signifikant gesteigerte Lipidperoxidation, im Lichtmikroskop Gewebeveränderungen in Gehirn, Leber, Hoden, Nieren und Milz	mögliche Folge Unfruchtbarkeit
Cig, Nazıroğlu 2015	Brustkrebszellen, 900, 1800, 2.450 MHz, 1 Stunde 12 µW/cm <sup>2</sup> , 0,36 ± 0,02 mW/kg, Abstand 0, 1, 5, 10, 20 und 25 cm; Calcium-Konzentrationen, ROS-Produktion im Zytoplasma, Zellüberleben, Apoptose, Caspase-3 und -9	im Abstand bis 10 cm waren intrazelluläre Calcium-Konzentrationen, ROS, Apoptose und Mitochondrienschädigung signifikant erhöht, Zellüberlebensrate signifikant vermindert	die TRPV1-Ionen-Kanäle werden durch die Strahlung durchlässiger für Ca <sup>2+</sup> -Ionen ohne Erwärmung der Zellkultur, das führt zu Erhöhung von ROS und Apoptose
Cleary et al. 1996	Hamster, Eierstock-Zellen; 2,45 GHz und 27 MHz 2 Stunden SAR 5 und 25 W/kg; Zellzyklus, -teilung und -wachstum von 2 Stunden bis zu 4 Tage nach der Bestrahlung	2,45-GHz-Strahlung bewirkte Änderungen in allen Phasen des Zellzyklus, doppelt so starke Wirkung wie 27 MHz	
Dasdag et al. 2015	männliche Ratten, Spermien, Hodengewebe, 12 Monate täglich 24 Stunden (SAR für Punkt, 1 g und 10 g Gewebe von Hoden und Prostata 4.880, 2.420 und 1.020 µW/kg	Hodenfunktionen verändert, Gestalt der Spermien war signifikant verschieden in den beiden Gruppen. Signifikante Erhöhung gab es beim Prozentsatz der defekten Spermienköpfe nach Bestrahlung, signifikant vermindertes Gewicht von Nebenhoden und Bläschendrüse, Durchmesser der Samenkanälchen signifikant, Dicke der Tunika albuginea hochsignifikant verändert	Langzeiteinwirkung kann Fruchtbarkeit beeinträchtigen
Deshmukh, Banerjee et al. 2013	Ratten, 900, 1.800, 2.450 MHz, 30 Tage 2 Stunden/Tag, 5 Tage/Woche; für 2.450 MHz SAR 6,672 × 10 <sup>-4</sup> W/kg DNA-Strangbrüche im Hirngewebe	signifikant erhöhte DNA-Strangbrüche	Mikrowellen können unterhalb des Grenzwertes von 2 W/kg DNA-Schäden im Hirngewebe hervorrufen, wahrscheinlich durch freie Radikale
Deshmukh, Banerjee et al. 2015	Ratten, 900, 1.800, 2.450 MHz, 180 Tage 2 Stunden täglich 5 Tage/Woche, SAR für 2.450 MHz 6,672 × 10 <sup>-4</sup> W/kg; Verhalten, HSP70 und DNA im Hirngewebe	Räumliche Orientierung, Lern- und Gedächtnisleistung signifikant beeinträchtigt; HSP70-Gehalte und DNA-Strangbrüche signifikant erhöht; Die DNA-Schäden waren signifikant höher bei 1.800 und 2.450 MHz im Vergleich zu 900 MHz	
Deshmukh, Banerjee et al. 2016	Ratten, 90 Tage, SAR 0,5953 mW/kg; 900, 1.800, 2.450 MHz; SAR für 2.450 MHz 6,672 × 10 <sup>-4</sup> W/kg; Verhalten, HSP70 und DNA im Hirngewebe	Verminderte Hirnleistung wie oben, signifikant erhöhte Werte von HSP70 und DNA-Strangbrüchen, bei 2.450 MHz am stärksten	
Eser et al. 2013	Ratten 900, 1.800 und 2.450 MHz 1 Stunde/Tag 2 Monate, 1,04 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 1,04 W/kg; Gehirne auf Histologie, oxidativen Status, IL-1β und Apoptose	bei 2.450 MHz meist die stärksten Auswirkungen: signifikante Degeneration der Nervenzellen, signifikante Abnahme der antioxidativen Kapazität, signifikant erhöhte IL-1β-Konzentration, signifikant erhöhte Apoptose	es könnten durch diese Veränderungen Funktionsstörungen und Krebsentwicklung entstehen
Gürler et al. 2014	Ratten, 1,04 mW/cm <sup>2</sup> , 3,17–4,88 V/m, SAR 0,02 W/kg, 1 Stunde/Tag für 30 Tage	Schädigung von DNA und Proteinen durch ROS; Erhöhte Konzentrationen von 8-OH-dG im Plasma und Hirngewebe; Knoblauch verhinderte die Erhöhung der 8-OH-dG-Konzentration im Hirngewebe	
Gümrall, Nazıroğlu 2009	Ratten, Blutplasma nach Bestrahlung mit 2,45 GHz 1 Stunde/Tag 28 Tage, SAR 0,1 W/kg, 11 V/m	oxidativer Stress, durch L-Carnitin verhindert, Selen hatte keine schützende Wirkung	
Hassanshahi et al. 2017	Ratten WLAN-Gerät 2,4–2,4835 GHz 12 Stunden/Tag 30 Tage, 23,6 dBm; Verhalten, Muscarinrezeptor 1 (für Acetylcholin), GABA-Transporter 1 (GAT1) im Hippocampusgewebe	Fähigkeit zur Objektunterscheidung signifikant reduziert, signifikant erhöhte Expression des Muscarinrezeptor 1	

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Holovska et al. 2015	Rattenleberzellen, 2,45 GHz 3 Stunden pro Tag 3 Wochen lang, Leistungsflussdichte 2,8 mW/cm <sup>2</sup> , licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen	starke strukturelle Veränderungen von Membranen, Zellkernen und Organellen, nekrotische Zellen, Gefäßveränderungen	
Kamali et al. 2017	menschliche Spermien, 40 Männer 19–40 Jahre (Durchschnitt 28,5 J.), 3G-WLAN-Gerät und Laptop, 50 Minuten-Download; SAR < 1,6 W/kg; Spermien, Fruchtbarkeit	nicht-signifikante Abnahme der Beweglichkeit in Klasse A und B, signifikante Abnahme in Klasse C, signifikant höher in Klasse D; Geschwindigkeit der Spermien signifikant geringer	Beeinträchtigungen unterhalb des als sicher angesehenen FCC-Grenzwertes; bei längerer Einwirkung könnten pH, Morphologie und Beweglichkeit stärker verändert sein
Kesari, Behari, Kumar 2010a	Ratten, 2 Stunden/Tag 35 Tage, 0,34 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 11 W/kg; im Hirngewebe antioxidative Enzyme, DNA-Brüche, Histonkinase	signifikant erhöhte DNA-Strangbrüche, signifikante Unterschiede zu den Kontrollen bei den Enzymen	Die Autoren gehen von freien Radikalen durch ROS-Überproduktion aus, die die Enzyme verändern
Kesari, Behari 2010b	Ratten, 2 Stunden/Tag 35 Tage, 0,34 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 11 W/kg; in Spermienzellen Zellzahl, antioxidative Enzyme, Apoptose	Zellzahl, Apoptose und antioxidative Enzyme waren signifikant verschieden von den Kontrollen	es könnten genetische Veränderungen auftreten
Kesari, Kumar, Behari 2012	Ratten, 2 Stunden/Tag 35 Tage, 0,21 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 0,14 W/kg; Rattenhirn, Zirbeldrüse auf Melatonin, gesamtes Hirngewebe auf Kreatinkinase, Caspase-3 und Calcium-Ionen-Konzentration	signifikanter Anstieg von Kreatinkinase und Calcium-Ionen-Konzentration im Hirngewebe, signifikante Abnahme des Melatonins, Caspase-3 kaum verändert	die Autoren schlussfolgern, dass es zu signifikanten Hirnschädigungen kommen kann
Kim, Rhee 2004	Ratten, Herzgewebe, 15 Minuten 40 mW/cm <sup>2</sup> , 9,2 W/kg, Gabe von Grüntee-Catechinen; 6 Tage später oxidative/antioxidative Parameter untersucht	signifikante Aktivierung des Oxidase-Systems, Bildung von Superoxid-Radikalen, Lipidperoxiden, oxidierten Proteinen, Schwächung des antioxidativen Abwehrsystems im Herzgewebe, durch Catechingabe signifikant reduzierte oxidative Schädigung	
Kumar et al. 2011	männlichen Ratten, 60 Tage 2 Stunden/Tag, 0,21 mW/cm <sup>2</sup> , 0,014 W/kg SAR; oxidative Parameter, Apoptose, Melatonin, Testosteron	signifikante Verminderung von Melatonin und Testosteron, signifikant erhöhte Apoptoserate und Kreatinkinase	
Kumari, Kesari et al. 2012	männliche Ratten, 900 und 2.450 MHz (Mikrowellenherd), 2 Stunden/Tag 35 Tage, 0,22 mW/cm <sup>2</sup> , Ganzkörper-SAR 0,15 W/kg, antioxidative und Leber-Enzyme	bei 2,45 GHz signifikante Veränderungen der Aktivitäten von GSH-Px, Leber-SOD, signifikant erhöhte Leber-Katalase und MDA in der bestrahlten Gruppe; signifikanter Anstieg von TBIL, ALT, AST und ALP gegenüber der Kontrolle	2,45-GHz-Strahlung induziert Überproduktion von freien Radikalen, hemmt die antioxidativen Enzyme und erzeugt oxidativen Stress in der Leber. Die MDA-Aktivität zeigt Zellmembranschädigung an
Lai et al. 1983	männliche Ratten, 45 Minuten 1 mW/cm <sup>2</sup> , 0,6 W/kg polarisierte 2.450-MHz-Strahlung, Puls 2 µW/sec 500 Pulse/sec; Wirkung der psychoaktiven Drogen Apomorphin, Amphetamin und Morphin	Erwärmung des Gewebes durch Apomorphin und Stereotypen wurden durch die 2,45-GHz-Strahlung gesteigert, Erwärmung des Gewebes durch Amphetamine wurde durch die Strahlung vermindert, Stereotypen kein Unterschied zur Kontrolle; Morphin-bedingte Letalität und Erstarung wurden durch die Strahlung bei bestimmter Dosierung gesteigert	Da die Drogen verschiedene Wirkungsweisen auf zentrale neuronale Mechanismen haben und die Wirkung der Mikrowellen von der Art der Droge abhängt, zeigen die Ergebnisse die komplexe Natur der Mikrowellenstrahlung auf Gehirnfunktionen
Lai et al. 1994	Ratten, 2,45 GHz 1 mW/cm <sup>2</sup> , 0,6 W/kg, Puls 2 µW/sec 500 Pulse/sec, 45 Minuten; Verhalten	Defizite im räumlichen Lernen, aber nicht nach Vorbehandlung mit dem cholinergen Agonisten Physostigmin oder dem Opiat-Antagonisten Naltrexon; Vorbehandlung mit dem peripheren Opiat-Antagonisten Naloxon-Methiodid	sowohl cholinerge als auch endogene Opioid-Neurotransmittersysteme im Gehirn sind beteiligt am Defizit des räumlichen Lernens nach Einwirken geringer Felder von 2,45 GHz
Lai, Singh 1996a	männliche Ratten, 2 Stunden 2 mW/cm <sup>2</sup> , 1,2 W/kg gepulste und kontinuierliche 2.450-MHz-Strahlung, Puls 2 µW/sec 500 Pulse/sec; Gehirne auf DNA-Strangbrüche	signifikant erhöhte Einfach- und Doppelstrangbrüche der DNA 4 Stunden nach Ende der Bestrahlung bei gepulster und kontinuierlicher Strahlung in den Hirnzellen der Ratten	

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Lai et al. 1996b	Ratten, 45 min, Puls 2 $\mu\text{W}/\text{sec}$ 500 Pulse/sec 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 0,6 W/kg; cholinerge Aktivität im Hippocampus, Wirkung von $\beta$ -Funaltrexamin (Opioid-Rezeptor-Antagonist)	2,45 GHz erzeugte signifikante Abnahme der cholinergen Aktivität im Hippocampus der Ratten, $\beta$ -Funaltrexamin hob diese hemmende Wirkung auf; Mikrowellen sind Stressoren	man möchte die Mechanismen der MW-Wirkung auf neurologische Funktionen und Verhalten im ZNS verstehen, Bestätigung früherer Ergebnisse, dass endogene Opioid-Rezeptoren Angriffspunkte sind
Lai, Singh 1997	Ratten, 2,45-GHz-Strahlung 2 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 1,2 W/kg 2 Stunden, Puls 2 $\mu\text{W}/\text{sec}$ 500 Pulse/sec; DNA-Strangbrüche im Gehirn, Wirkung von Melatonin und N-tert-butyl-a-phenylnitron (PBN)	signifikant erhöhte Einfach- und Doppelstrangbrüche der DNA 4 Stunden nach Ende der Bestrahlung; Vorbehandlung der Zellen mit Radikalfängern verhindert DNA-Brüche Behandlung mit Melatonin oder PBN vor und sofort nach der Bestrahlung verhindert die Mikrowellenwirkung	Da beide Stoffe (Mel und PBN) sehr wirksame Radikalfänger sind, wird angenommen, dass freie Radikale an der DNA-Schädigung im Gehirn beteiligt sind. DNA-Brüche können zu neurodegenerativen Erkrankungen und Krebs führen. s. Hypothese von Litovitz 1997
Lai 2004	Ratten, kontinuierliche 2,45-GHz-Strahlung 2 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 1,2 W/kg und 60 mG (6,0 $\mu\text{T}$ ) inkohärentes Hintergrund-Magnetfeld 1 Stunde; Verhalten nach Trainingstests	signifikante Defizite im räumlichen Lernen bei bestrahlten Tieren ohne Hintergrundfeld, mit Hintergrundfeld ähnliches Verhalten wie Kontrolltiere	s. Hypothese von Litovitz 1997
Lai, Singh 2005	Ratten, 2,45 GHz 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , 0,6 W/kg und 45 mG (4,5 $\mu\text{T}$ ) inkohärentes Hintergrund-Magnetfeld 2 Stunden; DNA-Strangbrüche im Hirngewebe 4 Stunden nach Ende der Bestrahlung	signifikant erhöhte Einzel- und Doppelstrangbrüche der DNA nur bei Bestrahlung mit 2,45-GHz allein, das Hintergrund-Magnetfeld allein und beide Felder zusammen zeigten kaum Unterschiede zur scheinbestrahlten Kontrolle	das inkohärente Hintergrundfeld könnte eine Reaktion der Zellen auf Mikrowellen gestört haben, s. Hypothese von Litovitz 1997
Lee et al. 2005	menschliche Promyelozyten-Leukämie-Zelllinie (HL-60-Zellen), 10 W/kg, Pulse 133 W/kg für 155 $\mu\text{sec}$ , 320 V/m; Genexpression nach 2 und 6 Stunden	Genexpression von 221 Genen war nach 2 h verändert (frühe Gene), nach 6 h 896 Gene; darunter Gene für Apoptose, Stoffwechsel, Polysaccharid-Biosynthese, RNA-Funktionen, Translation, Transport, Stoffwechsel und Zellzyklus	Gene für HSPs waren nicht betroffen, das bedeutet, dass es nicht-thermische Reaktionen sind
Li et al. 2008	Ratten, 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ 3 Stunden täglich 30 Tage (chronische Einwirkung); Lernen/Gedächtnis; Apoptose, Corticosteron, Glucocorticoid-Rezeptoren (GR) im Hippocampus	Corticosterongehalte, Apoptoseraten im Hippocampus hochsignifikant erhöht, Glucocorticoid-Rezeptoren verschoben	Lern- und Gedächtnisdefizite durch Veränderung der Corticosteroide
Maes et al. 1993	Menschliche Lymphozyten von Freiwilligen mit 80 $\text{mW}/\text{ml}$ , 50-Hz-Pulse (75 W/kg) 30 und 120 Minuten bestrahlt; Chromosomenaberrationen, Mikrokerne, Schwesterchromatid-Austausch und Zellkinetik	signifikanter 2- und 3-facher Anstieg an Chromosomenaberrationen und Mikrokernen nach 30 bzw. 120 Minuten; Schwesterchromatid-Austausch und Zellkinetik kaum beeinflusst	
Maganioti et al. 2010	15 Männern und 15 Frauen Gedächtnistests und EEG	signifikante Unterschiede im $\alpha$ - und $\beta$ -Band, auch signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern	physiologische Änderungen durch die WLAN-Strahlung
Margaritis et al. 2014	Drosophila-Eientwicklung, viele Feldquellen, darunter Mikrowellenherd, Bluetooth (geringste Feldstärke von 0,3 V/m in den ersten 7 Tagen) und WLAN (2,44 GHz, 2,1 V/m, 10 Hz gepulst, Pulsdauer 1 ms, 1 Stunde/Tag); Reproduktionskapazität, Apoptose, Nachkommen	statistisch signifikante Erhöhung der Apoptoserate, Fekundität um 10 % bei WLAN und Bluetooth vermindert, bei den Nachkommen signifikant verminderte Anzahl der Puppen	Art der Pulsung scheint für Schädigungen verantwortlich zu sein, da ungepulste Quellen trotz stärkerer Felder geringere Auswirkungen hatten
Meena, Kesari et al. 2014	männliche Ratten, Hodengewebe 2 Stunden täglich mit 0,21 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , SAR 0,14 W/kg, 45 Tage Melatonin, Spermien, Testosteron, DNA, Apoptose, oxidative Parameter	signifikant erhöhte Apoptose, DNA-Strangbrüche, Konzentrationen von MDA und ROS im Hoden; signifikante Abnahme von Testosteron; desorganisierte Samenkanälchen und Entzündungen in Hodenzellen, Melatonin verhinderte oxidativen Stress	Es gibt die Überlegung, ob Mikrowellen einen Einfluss auf die Polarisation der Zellmembranen haben könnten und dass Melatonin z.T. auf die Xanthinoxidase einwirkt, deren Aktivität durch die Strahlung signifikant erhöht wurde. Melatonin könnte therapeutisch eingesetzt werden



Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Megha, Banerjee et al. 2015	Ratten, 900, 1.800, 2.450 MHz, SAR 0,59, 0,58 und 0,66 mW/kg, 60 Tage, 2 Stunden/Tag, 5 Tage/Woche; oxidative Parameter, DNA, Interleukine im Hippocampus	ROS-Bildung, signifikant verminderter Antioxidationsstatus, Zytokine signifikant erhöht, signifikante DNA-Schädigungen. 2.450 MHz hatte bei allen Tests das größte Schädigungspotential	
Misa-Agustiño et al. 2012	Ratten, Schilddrüse, SAR-Werte 0,046, 0,104 und 0,482 W/kg in der Schilddrüse, Ganzkörperwerte 0,0169, 0,0364 und 0,161 W/kg; HSP70, HSP90	HSP-Konzentrationen nach 90 min. signifikant verringert, nach 24 Stunden wieder erhöht, aber unter den Kontrollwerten	
Misa-Agustiño et al. 2015	Thymuszellen von weiblichen Ratten, Bestrahlung 30 Minuten, SAR im Thymus 0,046, 0,104 und 0,482 W/kg, Ganzkörperwert 0,0169, 0,0364 und 0,161 W/kg; 90 min. nach Bestrahlung Morphologie, HSP70, HSP90, Glucocorticoid-Rezeptoren	viele morphologische Veränderungen, Änderung der Permeabilität des Endothels und der Glucocorticoid-Rezeptoren; mehr Blutgefäße und rote Blutkörperchen außerhalb der Gefäße; HSP 90 vermindert	die Befunde deuten auf Zellstress hin
Nakamura et al. 2000	Ratten, kontinuierliche 2,45-GHz-Strahlung 2 mW/cm <sup>2</sup> , 90 Minuten; Schwangerschaft, Uterus, Blutfluss zwischen Uterus und Plazenta, Hormone und biochemische Mediatoren (Corticosteron, Estradiol, Prostaglandin E <sub>2</sub> und Prostaglandin F <sub>2α</sub> )	Blutfluss durch die Strahlung vermindert, Progesteron und Prostaglandin F <sub>2α</sub> in den trächtigen Tieren gesteigert; Steigerung von Corticosteron und Abnahme von Estradiol war in trächtigen und nicht-trächtigen Tieren ähnlich	Die Störungen im Kreislauf Uterus/Plazenta durch 2,45 GHz sind wahrscheinlich vom Prostaglandin F <sub>2α</sub> verursacht und könnten ein Risiko für Schwangerschaften darstellen
Naziroğlu, Gümrak 2009	Ratten, 28 Tage 1 Stunde täglich 11 V/m, SAR Ganzkörper 0,1 W/kg, lokal im Gehirn 1,73 W/kg; EEG und Hirngewebe (Cortex) auf oxidative Parameter, Gabe von Selen oder L-Carnitin, Vitamine A, C und E	leichte Übererregbarkeit im EEG, kompensiert durch Selen und L-Carnitin; vermindert die Vitamine A, C und E, oxidative Parameter verändert, Schutz vor oxidativer Schädigung durch L-Carnitin und Selen	Sowohl die Vitamine als auch L-Carnitin und Selen haben schützende Wirkung vor oxidativer Schädigung des Hirngewebes vor ROS. L-Carnitin und Selen scheinen die antioxidativen Vitamine vor der Hemmung durch die 2,45-GHz-Strahlung zu schützen
Naziroğlu et al. 2012a	Hirngewebe von männlichen Ratten, WLAN-Gerät 1 mW/m <sup>2</sup> , Ganzkörper-SAR 0,143 W/kg, 10 V/m 1 Stunde/Tag 30 Tage; EEG, Überlebensrate, Ca <sup>2+</sup> -Gehalt, oxidative Parameter, β-Carotin, Vitamine A, C und E, Melatoningabe	die WLAN-Strahlung erzeugte oxidativen Stress in den Nervenzellen, EEG, Vitamine verändert, der Ca <sup>2+</sup> -Einstrom wird erhöht, Melatonin verminderte die Schädigung und die Abnahme von Vitamin E. Am Ca <sup>2+</sup> -Einstrom in die Zellen sind spannungsabhängige und TRPM2-Calciumkanäle beteiligt	Die Strahlung von WLAN-Geräten bewirkt oxidative Schädigung über Calciumkanäle und Ca <sup>2+</sup> -Anstieg in der Zelle. Melatonin schützt das Hirngewebe vor Schäden durch Abwehr des oxidativen Stresses
Naziroğlu et al. 2012b	menschliche Leukämiezellen, WLAN-Gerät 2,45 GHz gepulst, 0,1–2,5 W/kg für 1, 2, 12 oder 24 Stunden; oxidative Parameter und Calcium <sup>2+</sup> -Einstrom in die Zellen	das WLAN-Gerät erzeugte oxidativen Stress und gesteigertes Zellwachstum durch signifikant erhöhten Ca <sup>2+</sup> -Einstrom in das Zytoplasma der menschlichen Leukämie-Krebszellen	
Özorak, Naziroğlu 2013	Ratten, männliche Nachkommen von Müttern, die während der Trächtigkeit mit 2.450, 900 und 1.800 MHz bestrahlt worden waren (1 Stunde/Tag, 5 Tage/Woche im Mutterleib und bis 6 Wochen nach der Geburt mit 12 μW/cm <sup>2</sup> , 10 V/m, SAR 0,01–1,2 W/kg Ganzkörper, Durchschnitt 0,18 ± 0,07 W/kg; Nieren und Hoden der 4, 5 und 6 Wochen alten Nachkommen auf Spurenelemente (Chrom, Kupfer, Eisen, Mangan, Selen und Zink), antioxidative Parameter, Vitamine A, E und β-Karotin	die 4 Wochen alten Tiere reagierten empfindlicher als die älteren, der oxidative Stress war höher; erhöhte Lipidperoxidation, oxidierbarer Eisengehalt und geringere Konzentrationen an Spurenelementen, TAS und GSH	Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass 900, 1.800 und 2.450 MHz zu oxidativem Stress in Nieren und Hoden junger Ratten führen können. Es sind Tiere, die sich in der Entwicklung befinden, vergleichbar der Pubertät beim Menschen
Oksay et al. 2014	Ratten, Hodengewebe, 1 mW/m <sup>2</sup> , 1 Stunde pro Tag, 30 Tage lang, Puls 217 Hz, 10 V/m, SAR ca. 0,143 W/kg; Lipidperoxidation, Vitamine A, C und E, Melatoningabe	erhöhte Lipidperoxidation in den Hoden, Melatoningabe verringert die Schädigungen	

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Orendacova et al. 2009	neugeborene (7 Tage alt) und erwachsene alte Ratten (24 Monate), gepulste 2,45-GHz-Strahlung 2,8 mW/cm <sup>2</sup> , 4 Stunden/Tag 2 Tage lang (akut) oder 8 Stunden/Tag 3 Tage lang (chronisch); Hippocampus-Regionen	signifikante Unterschiede im Zellwachstum bei den neugeborenen Ratten, bei den alten nicht	schädigende Einflüsse auf die Neurogenese besonders bei Neugeborenen
Orendacova et al. 2011	Ratten, 2 Altersstufen: 7 (neugeborene) und 28 Tage (junge Erwachsene) 2,8 mW/cm <sup>2</sup> 2 Stunden; das frühe Genprodukt Fos-Protein und NO-produzierende Zellen	Fos-Protein und NO-produzierende Zellen signifikant erhöht bei den bestrahlten Tieren, früheres Auftreten als bei den Kontrollen	bei sehr jungen Ratten ist die Entwicklung verändert, sie scheinen eine Art Frühreife durchzumachen
Othman et al. 2017	weibliche Ratten bestrahlt mit normalem WLAN-Router, 2 Stunden täglich über die Dauer der Schwangerschaft; bei Nachkommen Verhalten, Gehirnentwicklung, oxidative Parameter, Cholinesterase-Aktivität	50 % weniger Nachkommen, bei den jungen Tieren Verzögerungen bei Reaktionen, Gleichgewichtssinn und Reifung des Bewegungsapparates, signifikant veränderte antioxidative Enzyme im Gehirn, Beeinträchtigung der Cholinesterase-Aktivitäten; später bei den erwachsenen Nachkommen kompensiert	das bei jungen Nachkommen vorübergehend gestörte Redox-Gleichgewicht (oxidativen Stress) könnte verzögerte Hirnentwicklung bedeuten, beeinträchtigte Cholinesterase-Aktivität könnte sich auf Neurotransmitter auswirken
Paknahad et al. 2016	Zähne, Amalgam Router-Laptop-System, Router 30 cm Abstand, Laptop 20 m, 20 Min. Bestrahlung	nach Bestrahlung mehr Quecksilber im Speichel als bei den Kontrollen	
Panagopoulos et al. 2015	natürliche Felder der Sonneneinstrahlung zwischen 8 und 24 mW/cm <sup>2</sup> , künstliche z.B. eines Mobiltelefons im Sprechmodus < 0,2 mW/cm <sup>2</sup> , Wirkung auf die Ionenkanäle in der Zellmembran	künstliche Felder sind aufgrund ihrer Polarisation stärker biologisch wirksam als die unpolarisierten natürlichen Felder, künstliche wirken durch zusätzliche elektrostatische Kräfte auf alle geladenen Teilchen (Ionen, Membranen) ein	Lebewesen haben sich auf Basis der geringen natürlichen Felder entwickelt, die stark auftretenden künstlichen beeinträchtigen Membranen
Papageorgiou et al. 2011	je 15 Männer und Frauen (durchschnittlich 24 Jahre), WLAN-Signal 0,49 V/m, P300-Komponente im EEG	signifikante Unterschiede bei bestrahlten und unbestrahlten Personen, auch reagierten Frauen und Männer unterschiedlich stark beim Einschalten des WLAN-Signals, P300-Komponente bei Männern signifikant niedriger, bei Frauen signifikant höher	P300 ist beteiligt an Aufmerksamkeit; WLAN beeinflusst die Nervenaktivität, Geschlechter reagieren unterschiedlich
Paulraj, Behari 2006a	junge Ratten, Hirngewebe 2,45 GHz, 2 Stunden täglich 35 Tage, 0,344 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 0,11 W/kg, Calcium-abhängige Proteinkinase C, Histologie	signifikante Abnahme der Proteinkinase C-Aktivität im Hippocampus, nicht-thermische Reaktion, vermehrt Gliazellen	die Befunde könnten Lern- und Gedächtnisdefizite erklären; Proteinkinase C ist auch an Krebsentstehung beteiligt
Paulraj, Behari 2006b	35 Tage alte männliche Ratten 0,344 mW/cm <sup>2</sup> , 1 W/kg, 35 Tage täglich 2 Stunden, 5 Tage/Woche; DNA-Schäden im Gehirn	signifikant erhöhte Einzelstrangbrüche	mögliches Risiko für Beeinträchtigung neurologischer Funktionen und Entstehung degenerativer Erkrankungen
Saili et al. 2015	Kaninchen, Accesspoint, 25 cm Entfernung, Bestrahlung 1 Stunde/Tag	Beeinflussung der Herzratenvariabilität, höherer Blutdruck	
Salah et al. 2013	Ratten, Leber und Nieren, 2,45 GHz eines Accesspoints 1 Stunde/Tag 21 Tage; Gewebeveränderungen, oxidativer Stress, Leberenzyme u.a.	Diabetes-artige Störungen des Zuckerstoffwechsels und oxidativen Stress in Leber und Nieren, durch Olivenblätter-Extrakt Milderung der Schäden	
Sangün et al. 2015	Ratten, 45,5 V/m, SAR Ganzkörper 0,143 W/kg, 1 Std./Tag	Exposition in der pränatalen Phase führt postnatal zu Wachstumseinschränkungen und verzögertem Eintritt in die Pubertät; ROS erhöht	junge Ratten reagieren empfindlich auf 2,45 GHz
Sarkar, Ali, Behari 1994	Mäuse, Gehirne und Hoden 2,45 GHz 1 mW/cm <sup>2</sup> kontinuierliche Strahlung, SAR 1,18 W/kg, 2 Stunden/Tag; DNA-Strangbrüche	signifikant erhöhte DNA-Brüche	die DNA-Schäden traten unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte auf unter nicht-thermischen Bedingungen
Shahin, Chaturvedi et al. 2013	weibliche Mäuse, 0,033549 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 0,023023 W/kg, 2 Stunden/Tag 45 Tage; Leber, Nieren, Eierstöcke, Blutzellen, ROS, Hormone, DNA	signifikante Veränderungen bei ROS, Hämoglobin, Gesamtzahl der Erythrozyten und Leukozyten, DNA-Strangbrüchen, Hormonen und Enzymaktivitäten, geringere Embryozahlen	entzündliche und physiologische Stressreaktionen in trächtigen Mäusen und führte zum Absterben der Embryos

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Shahin et al. 2014	männliche Mäuse, 2,45 GHz kontinuierliche Strahlung 2 Stunden/Tag 30 Tage, 0,029812 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 0,018 W/kg; Leber, Nieren, Hypothalamus, Hoden, Spermien, Testosteron, oxidative Parameter	signifikante Veränderungen in allen untersuchten Parametern	durch oxidativen und nitrosativen Stress (freie Radikale) sowie durch Degeneration des Hodengewebes kann Unfruchtbarkeit entstehen
Shahin, Banerjee, Chaturvedi et al. 2015	Mäuse, 15, 30 und 60 Tage, kontinuierliche Strahlung 2 Stunden/Tag, 0,0248 mW/cm <sup>2</sup> , 0,0146 W/kg; Verhalten, im Hippocampus oxidative Parameter, Kreatinkinase, Morphologie, Apoptose	Lern- und Gedächtnisdefizite steigern sich mit Dauer der Bestrahlung, erhöhter oxidativer/nitrosativer Stress und erhöhte Apoptose; Dendriten und Verzweigungen vermindert	der oxidative/nitrosative Stress im Hippocampus führt über p53 zu Apoptose und Verlust des räumlichen Gedächtnisses durch verminderte Entwicklung der Neuronen
Shahin, Banerjee, Chaturvedi et al. 2017	erwachsene männliche Mäuse, kontinuierliche Strahlung 15, 30 und 60 Tage, 2 Stunden/Tag, 0,0248 mW/cm <sup>2</sup> , 0,0146 W/kg; Verhalten, Corticosteron, Expression von GR, CRH, i-NOS, iGluRs, PSD-95-nNOS-System und PKA-PKCε-ERK1/2-pERK1/2 im Hippocampus	signifikant verminderte Lern- und Gedächtnisleistung, signifikant erhöhte Konzentrationen von Corticosteron und Expression von CRH, CRH-R1 und i-NOS, während die Expression von iGluRs, n-NOS, PSD-95, PKCε, PKA, ERK-p-ERK, CREB und p-CREB abnahm	Apoptose durch oxidativen Stress (freie Radikale) führt unter Beteiligung von Corticosteron über den iGluR/ERK/CREB-Signalweg zu Defiziten beim Lernen und räumlichen Gedächtnis
Shokri et al. 2015	Ratten, Hoden, Spermienzellen, 2 WLAN-Antennen an gegenüberliegenden Wänden im Raum, 2 Monate 1 Stunde oder 7 Stunden/Tag; Apoptose, Spermien- und Gewebeveränderungen	Hodengewebe signifikant verändert, Apoptose signifikant erhöht, stärker nach 7 Stunden	Die Forscher empfehlen, WLAN-Bestrahlung zeitlich zu begrenzen
Sinha et al. 2008	Ratten, 2 Stunden täglich 16,5 µW/cm <sup>2</sup> , 21 Tage; Schlaf-EEG, Verhalten; Bestimmung von T <sub>3</sub> und T <sub>4</sub>	Schlaf-EEG und Schlaf-Wach-Parameter signifikant verschieden von Kontrollen, Körpertemperatur kaum verschieden, thermische Wirkung unwahrscheinlich; T <sub>3</sub> signifikant niedriger, T <sub>4</sub> signifikant erhöht, bestrahlte Tiere waren hyperaktiv	
Sinha RK 2008	männliche Ratten, 16,5 µW/cm <sup>2</sup> , Bestimmung der Hormone T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> und TSH, Verhalten	thermische Wirkung unwahrscheinlich; T <sub>3</sub> signifikant niedriger, T <sub>4</sub> signifikant erhöht; TSH kaum verändert; erhöhter Wassergehalt des Gehirns (Schwellung um 6,97 %); Verhalten signifikant verschieden von den Kontrollen, hyperaktiv	mögliche Verbindung zwischen Verhalten und Schilddrüsenhormonfunktionen, da die mit Neurohormonen und Transmittern zusammenwirken
Soran et al. 2014	Petersilie, Dill, Sellerie, WLAN-Router, 100 mW/m <sup>2</sup> 70 mW/m <sup>2</sup>	Reduktion der Organellengrößen, Verschlechterung Photosynthese, dünnere Zellwände u.a.	
Szmigielski et al. 1982	Haut von Mäusen, 2,45-GHz-Strahlung 1 bis 6 Monate 2 Stunden täglich, 6 Tage/Woche, 5 oder 15 mW/cm <sup>2</sup> ; verschiedene Kontrollen, Benzopyren	Bestrahlung erzeugte doppelt so viele Hauttumore und signifikant schnelleres Wachstum der Hauttumoren	
Taheri et al. 2015	Klebsiella pneumonia auf Antibiotika-Resistenz, WLAN-Router 3, 4,5 und 8 Stunden	die Strahlung erhöhte die Empfindlichkeit gegen die 5 Antibiotika nach 4,5 Stunden, danach Resistenzentwicklung	Fenstereffekt, Zellwände könnten durch die Strahlung durchlässiger werden
Taheri et al. 2017	Listeria monozytogenes und E. coli, Bestrahlung mit 900 und 2.450 MHz, normaler WLAN-Router 2,45 GHz, SAR 0,13 W/kg in 14 cm Abstand zur Bakteriensuspension; 6 Antibiotika	nach Bestrahlung signifikant stärkeres Wachstum und signifikant erhöhte Resistenzentwicklung gegen 6 Antibiotika	in einem Feldstärke-Fenster entsteht Antibiotika-Resistenz
Testylier 2002	Ratten Hippocampus, ACh-Ausschüttung im Gehirn Kurzzeit 1 h, 2 und 4 mW/cm <sup>2</sup>	Signifikant verminderte ACh-Ausschüttung bei 4 mW/cm <sup>2</sup>	Acetylcholin ist als Neurotransmitter an Lernprozessen beteiligt
Tök, Naziroğlu 2014	Ratten, Augenlinsen, 2,45 GHz, 217 Hz gepulst, 1 Stunde täglich 1 mW/m <sup>2</sup> 30 Tage, 11 V/m, etwa 0,1 W/kg Ganzkörper-SAR; Lipidperoxidation, GSH, GSH-Px, Melatonin	signifikante Veränderung der oxidativen Parameter, Melatonin mildert die Schädigungen	

Autoren	Experimentelle Bedingungen	Ergebnisse	Bemerkungen
Türker, Naziroğlu et al. 2011	Ratten, Herzgewebe, Selen und L-Carnithin zusätzlich zur 2,45-GHz-Bestrahlung (1 Stunde/Tag 28 Tage lang) und bestimmten die Lipidperoxidation und die Konzentrationen der antioxidativen Substanzen Vitamin A, C und E im Herzgewebe	signifikant höhere Lipidperoxidation und Glutathionperoxidase, durch Selen und L-Carnithin signifikant vermindert; Konzentrationen der Vitamine C, A und E waren vermindert bei den bestrahlten Tieren, jedoch höher bei den mit Selen und L-Carnithin behandelten	2,45-GHz-Strahlung verursacht oxidativen Stress im Herzgewebe der Ratten. Die Gabe von Selen und L-Carnithin konnte die oxidative Wirkung der 2,45-GHz-Strahlung reduzieren
Wang, Lai 2000	Ratten, gepulste 2,45-GHz-Strahlung, 1 Stunde Puls 2 ms, 500 Pulse/s, 2 mW/cm <sup>2</sup> , Ganzkörper-SAR 1,2 W/kg; Verhalten	Die akute Einwirkung von 2,45 GHz-Mikrowellen beeinflusste das Verhalten der Ratten signifikant	Das veränderte Verhalten könnte auf die Abnahme der cholinergen Aktivität im Gehirn (im frontalen Cortex und Hippocampus) der Tiere zurückgehen
Yang et al. 2010	Mäuse, gepulste 2,45-GHz-Strahlung 20 Minuten, SAR 6 W/kg; Mikroglia in Gehirnen	die Mikroglia wurden durch die 2,45-GHz-Strahlung aktiviert unter Beteiligung von TNF- $\alpha$ , NO und ROS, es folgte eine pro-entzündliche Reaktion, gleichzeitig wurde der JAK-STAT-Signalweg aktiviert.	Die Strahlung stellt einen externen physikalischen Faktor dar, der über die Aktivierung der Mikroglia zu entzündlichen Prozessen und Schädigung des Nervengewebes führen kann
Yang et al. 2012	erwachsene männliche Ratten, 2,45 GHz gepulst 20 Minuten, 65 mW/cm <sup>2</sup> , SAR 6 W/kg, Stress-bezogene Gene untersucht	Von 2048 Genen waren 3 Stunden nach der Bestrahlung im Hippocampus 41 relevante Gene signifikant verändert, 23 hoch- und 18 herunterreguliert. 7 Gene betrafen die Stress-bezogenen Hitzeschockproteine oder Chaperone, davon vor allem die Gene für HSP27 und HSP70, deren Expression im Hippocampus signifikant erhöht war, speziell in den Pyramidenzellen des Ammonhorns (CA3-Region) und in den Granulazellen des Gyrus dentatus	Die Daten liefern direkte Beweise dafür, dass die 2,45-GHz-Strahlung Stressreaktionen im Hippocampus von Ratten auslöst. Die beiden HSPs waren zu verschiedenen Zeitpunkten maximal erhöht, sie haben unterschiedliche Funktionen
Yüksel, Naziroğlu, Özkaya 2016	trächtige Ratten und deren Nachkommen, Langzeit-Bestrahlung mit 900, 1.800 und 2.450 MHz 1 Stunde/Tag 5 Tage/Woche über die gesamte Trächtigkeit, die Nachkommen für insgesamt 1 Jahr (52 Wochen 11 V/m, Ganzkörper-SAR 0,1 W/kg); Blutserum und Gebärmutter-Gewebe, Lipidperoxidation, GSH, Enzymaktivitäten, antioxidative Vitamine A, C und E im Blutplasma der Mütter, Prolaktin, Östrogen und Progesteron im Serum	Alle 3 Frequenzen erzeugten nach Langzeitbestrahlung (1 Jahr lang 1 Stunde täglich 5-mal/Woche) Änderungen der Hormonkonzentrationen und oxidativen Stress in den Muttertieren und den Nachkommen; bei 2,45 GHz stärkere Wirkung als bei 900 und 1.800 MHz	Die Forscher schließen nicht aus, dass bei längerem Bestrahlungszeitraum weitere Veränderungen auftreten, die auch beim Menschen vorkommen könnten, besonders bei jungen Teenagern, die ihr Mobiltelefon oft mehrere Stunden täglich nutzen
Zhu et al. 2016	Herzmuskelzellen von Ratten, 50, 100, 150 und 200 mW/cm <sup>2</sup> für 6 Minuten; Untersuchung von ATP-Aktivität, Atmungskette in den Mitochondrien, die Enzyme CK, LDH und AST, Troponin I, die oxidativen Parameter SOD, GSH und Lipidperoxidation, die Apoptose-Proteine (MAPK-Kaskade) und Morphologie	signifikante Veränderungen aller biochemischen Parameter, z.T. hochsignifikant; je höher die Dosis, desto stärker die Veränderung; ebenso die morphologischen Veränderungen, z.B. unregelmäßige Streifung der Herzmuskelzellen, Verfärbung der Zellkerne, weniger Mitochondrien mit zerstörten Membranen, andere degenerative Erscheinungen; signifikant erhöhte Apoptose-Proteine und Apoptoseraten	die Strahlung erzeugt in Herzmuskelzellen Apoptose über den Mitochondrienweg
Zotti-Martelli et al. 2000	menschliche Lymphozyten zweier gesunder 27-jähriger Personen mit 3 verschiedenen Geräten pro Frequenz (2,45 und 7,7 GHz), bestrahlt mit 15, 30 und 60 min bei 10, 20 und 30 mW/cm <sup>2</sup> , verblindet ausgewertete Doppelansätze; Mikrokerneltest	die Häufigkeit der Mikrokerne in den bestrahlten Lymphozyten stieg bei beiden Frequenzen mit Dauer und Feldstärke an, war signifikant erhöht bei 30 und 60 Minuten und den höchsten Feldstärken, der Zellzyklus war nicht beeinflusst	2,45 ist die Resonanzfrequenz von Wasser*, es gab keine Temperaturerhöhung im Experiment. Man erinnert daran, dass bei Radartechnikern vermehrt Neurasthenie, Gefäßschäden im Nervensystem und Krebssterblichkeit auftreten. Die Forscher empfehlen Maßnahmen zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung

## Literaturliste /Anmerkung

\* Anmerkung zu den Studien von Ballardin und Zotti-Martelli:

In den Studien von Ballardin und Zotti-Martelli werden 2,45 GHz als Resonanzfrequenz des Wassers bezeichnet. Mikrowellen können bei jeder Frequenz die Wassermoleküle zu Dipol- und Multipolschwingungen anregen und Temperaturerhöhungen bewirken. Für diesen Absorptionsmechanismus gibt es keine Resonanzfrequenz im strengen Sinne, wohl aber einen breiten Frequenzbereich im Mikrowellenbereich um 30 GHz, also oberhalb von 2,45 GHz, bei dem die Absorption relativ hoch ist (vgl. [http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave\\_water.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html)). Dieser Bereich hängt unter anderem von der Temperatur ab. Die niedrigste Resonanzfrequenz, d.h. die niedrigste Frequenz mit höchster Absorption, liegt für das freie Wassermolekül bei ca. 22 GHz. Mit der in Mikrowellenherden verwendeten Frequenz von 2,45 GHz wird ein Kompromiss zwischen nicht ganz so hoher Absorption, aber dafür höherer Eindringtiefe in das Gargut erzielt: Denn die Eindringtiefe nimmt mit steigender Frequenz ab. Bei der Ganzkörperabsorption von Mikrowellen in Lebewesen spielt die Größe des bestrahlten Objekts neben der Frequenz der Mikrowelle eine wesentliche Rolle. Maxima der Absorption ergeben sich bei den Mikrowellen, bei denen die halbe Wellenlänge ungefähr gleich der Körpergröße ist und die elektrische Feldstärkekomponente der Mikrowelle parallel zur Längsachse des Körpers liegt (worst case). Bei höheren und niedrigeren Frequenzen sinkt die Absorption wieder ab. Beim Erwachsenen (Größe ca. 2m) liegt das Maximum der Absorption bei ca. 70 MHz, bei kleineren Personen, Kindern und Babys entsprechend höher, bei Affen bei ca. 300 MHz und bei einer Maus bei 2,45 GHz, da ihr Körper ungefähr die Größe der halben Wellenlänge von 6 cm besitzt. Da die meisten Studien mit Mäusen oder Ratten (vergleichbarer Größe) gemacht wurden, handelt es sich bei 2,45 GHz also um die Frequenz mit der höchsten Absorptionsrate (Absorptionsmaximum) bei diesen Tieren (bei einer Leistungsflussdichte von 10 W/m<sup>2</sup> werden lt. Bernhardt bei einer Maus 1,8 W/kg bei dieser Frequenz absorbiert). Höhere oder niedrigere Frequenzen führen zu geringeren Absorptionsraten. (Quelle: J. H. Bernhardt: Mobilfunk und Elektromog. Biologische Wirkung von elektromagnetischer Strahlung. Phys. Bl. 51 (1995) Nr. 10, 947–950).

Adams JA, Galloway TS, Mondal D, Esteves SC, Mathews F (2014): Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis. *Review. Environ Int* 70, 106–112

Agarwal A, Singh A, Hamada A, Kesari K (2011): Cell phones and male infertility: a review of recent innovations in technology and consequences. *Review. Int Braz J Urol* 2011 37 (4), 432–454

Aggarwal Y, Singh SS, Sinha RK (2013): Chronic exposure of low power radio frequency changes the EEG signals of rats: low power radio frequency alters EEG. *Advances in Biomedical Engineering Research (ABER)* 1 (2), [www.seipub.org/ABER/paperInfo.aspx?ID=3562](http://www.seipub.org/ABER/paperInfo.aspx?ID=3562)

Akdag MZ, Dasdag S, Canturk F, Karabulut D, Caner Y, Adalier N (2016): Does prolonged radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi devices induce DNA damage in various tissues of rats? *J Chem Neuroanat* 75, 116–122

Atasoy HI, Gunal MY, Atasoy P, Serenay Elgun S, Bugdayci G (2013): Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. *Journal of Pediatric Urology* 9, 223–229

Avendano C, Mata A, Sanchez Sarmiento CA, Doncel GF (2012): Use of laptop computers connected to internet through Wi-Fi decreases human sperm motility and increases sperm DNA fragmentation. *Fertil Steril* 97 (1), 39–45.e2

Aweda MA, Gbeneditise S, Meidinyo RO (2003): Effects of 2.45 GHz microwave exposures on the peroxidation status in Wistar rats. *Niger Postgrad Med J* 10 (4), 243–246

Aynali G, Naziroğlu M, Çelik Ö, Doğan M, Yarıkaş M, Yasan H (2013): Modulation of wireless (2.45 GHz)-induced oxidative toxicity in laryngotracheal mucosa of rat by melatonin. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 270 (5), 1695–1700

Ballardin M, Tusa I, Fontana N, Monorchio A, Pelletti C, Rogovich A, Barale R, Scarpato R (2011): Non-thermal effects of 2.45 GHz microwaves on spindle assembly, mitotic cells and viability of Chinese hamster V-79 cells. *Mutat Res* 716 (1-2), 1–9

Banaceur S, Banasr S, Sakly M, Abdelmelek H (2013): Whole body exposure to 2.4 GHz WIFI signals: effects on cognitive impairment in adult triple transgenic mouse models of Alzheimer's disease (3xTg-AD). *Behav Brain Res* 240, 197–201

Becker K (2007): Molekulare Maschinen und Alterung – der humane Redoxstoffwechsel, in: Spiegel der Forschung, Juni 2007; [geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2007/4780/pdf/SdF-2007-1\\_42-47.pdf](http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2007/4780/pdf/SdF-2007-1_42-47.pdf)

Behari J, Rajamani P (2012): Electromagnetic field exposure effects (ELF-EMF and RFR) on fertility and reproduction. *BiolInitiative Report Section 18*

Bellieni CV, MD, Pinto I (2012): Fetal and neonatal effects of EMF. *BiolInitiative Report Section 19*

Blank M (2014): Overpowered. What science tells us about the dangers of cell phones and other WiFi-age devices. Seven Stories Press, New York

British Columbia Centre for Disease Control (BCCDC), Environmental Health Services; Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH) (2013): Radiofrequency toolkit for environmental health Practitioners, ISBN: 978-1-926933-48-1

Cammaerts MC, Johansson O (2014): Ants can be used as bio-indicators to reveal biological effects of electromagnetic waves from some wireless apparatus. *Electromagn Biol Med* 33 (4), 282–288

Cassel JC, Cosquer B, Galani R, Kuster N (2004): Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats. *Behav Brain Res* 155, 37–43

Ceyhan AM, Akkaya VB, Gülecol SC, Ceyhan BM, Özgüner F, Chen WC (2012): Protective effects of  $\beta$ -glucan against oxidative injury induced by 2.45-GHz electromagnetic radiation in the skin tissue of rats. *Arch Dermatol Res* 304, 521–527

Chaturvedi CM, Singh VP, Singh P, Basu P, Singaravel M, Shukla RK, Dhanwan A, Pati AK, Gangwar RK, Singh SP (2011): 2.45 GHz (CW) microwave irradiation alters circadian organization, spatial memory, DNA structure in the brain cells and blood cell counts of male mice, *mus musculus. Progr Electromagn Res B* 29, 23–42

Chauhan P, Verma HN, Sisodia R, Kesari KK (2017): Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: Whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats. *Electromagn Biol and Med* 36 (1), 20–30

Chen YP, Jia JF, Wang YJ (2009): Weak microwave can enhance tolerance of wheat seedlings to salt stress. *J Plant Growth Regul* 28 (4), 381–385

Cig B, Naziroğlu M (2015): Investigation of the effects of distance from sources on apoptosis, oxidative stress and cytosolic calcium accumulation via TRPV1 channels induced by mobile phones and Wi-Fi in breast cancer cells. *BiochimBiophys Acta* 1848, 2756–2765

Cleary SF, Cao G, Liu LM (1996): Effects of isothermal 2.45 GHz microwave radiation on the mammalian cell cycle: comparison with effects of isothermal 27 MHz radiofrequency radiation exposure. *Bioelectrochem Bioenerg* 39 (2), 167–173

Cobb BL, Jauchem JR, Adair ER (2004): Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure. *Bioelectromagnetics* 25, 49–57

Cosquer B, Galani R, Kuster N, Cassel JC (2005): Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter anxiety responses in rats: a plus-maze study including test validation. *Behav Brain Res* 156, 65–74

Czerska EM, Elson EC, Davis CC, Swicord ML, Czerski P (1992): Effects of continuous and pulsed 2.450-MHz radiation on spontaneous lymphoblastoid transformation of human lymphocytes in vitro. *Bioelectromagnetics* 13 (4), 247–25

Dama MS, Bhat MN (2013): Mobile phones affect multiple sperm quality traits: a meta-analysis. *Review. F1000Res* 2, 40

Dasdag S, Tas M, Akdag MZ, Yegin K (2015): Effect of long-term exposure of 2.4 GHz radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi equipment on testes functions. *Electromagn Biol Med* 34 (1), 37–42

Desai NR, Kavindra K Kesari KK, Agarwal A (2009): Pathophysiology of cell phone radiation: oxidative stress and carcinogenesis with focus on male reproductive system. *Review. Reprod Biol and Endocrinol* 7, 114

Deshmukh PS, Megha K, Banerjee BD, Ahmed RS, Chandna S, Abegaonkar MP, Tripathi AK (2013): Detection of low level microwave radiation induced deoxyribonucleic acid damage vis-à-vis genotoxicity in brain of Fischer rats. *Toxicol Int* 20, 19–24

Deshmukh PS, Nasare N, Megha K, Banerjee BD, Ahmed RS, Singh D, Abegaonkar MP, Tripathi AK, Mediratta PK (2015): Cognitive impairment and neurogenotoxic effects in rats exposed to low-intensity microwave radiation. *Int J Toxicol* 34 (3), 284–290

Deshmukh PS, Megha K, Nasare N, Banerjee BD, Ahmed RS, Abegaonkar MP, Tripathi AK, Mediratta PK (2016): Effect of low level subchronic microwave radiation on rat brain. *Biomed Environ Sci* 29 (12), 858–867

Eser O, Songur A, Aktas C, Karavelioglu E, Caglar V, Aylak F, Ozguner F, Kanter M (2013): The effect of electromagnetic radiation on the rat brain: an experimental study. *Turk Neurosurg* 23 (6), 707–715

- Fortune JA, Wu BI, Klibanov AM (2010): Radio frequency radiation causes non thermal damage in enzymes and living cells. *Biotechnol Prog* 26 (6), 1772–1776
- Foster KR, Moulder JE (2013): Wi-Fi and health: review of current status of research. *Health Phys* 105 (6), 561–575
- Foster KR (2013): A world awash with wireless devices: radio-frequency exposure issues. *IEEE Microwave Mag* 14, 73–84
- Foster KR, Moulder JE (2015): Can Wi-Fi affect brain function? *Radiat Res* 184 (6), 565–7
- Gürler HS, Bilgici B, Akar AK, Tomak L, Bedir A (2014): Increased DNA oxidation (8-OHdG) and protein oxidation (AOPP) by low level electromagnetic field (2.45 GHz) in rat brain and protective effect of garlic. *Int J Radiat Biol* 90 (10), 892–896
- Gümrül N, Nazıroğlu M, Koyu A, Ongel K, Celik Ö, Saygin M, Kahrman M, Caliskan S, Kayan M, Gencil O, Flores-Arce MF (2009): Effects of selenium and L-carnitine on oxidative stress in blood of rat induced by 2.45-GHz radiation from wireless devices. *Biol Trace Elem Res* 132, 153–163
- Gye MC, Park CJ (2012): Effect of electromagnetic field exposure on the reproductive system. *Review Clin Exp Reprod Med* 39 (1), 1–9
- Hassanshahi A, Shafeie SA, Fatemi I, Hassanshahi E, Allahtavakoli M, Shabani M, Roohbakhsh A, Shamsizadeh A (2017): The effect of Wi-Fi electromagnetic waves in unimodal and multimodal object recognition tasks in male rats. *Neurol Sci* 38 (6), 1069–1076
- Hecht K (2015): Ist die Unterteilung in ionisierende und nichtionisierende Strahlung noch aktuell? Forschungsbericht der Kompetenzinitiative e.V.
- Hecht K. (2017): Der elektromagnetische Ozean – Lebenswichtiger Umweltfaktor in Gefahr. *Die Naturheilkunde* 94 (1), 14–15
- Hensinger P, Wilke I (2016): Mobilfunk: Neue Studienergebnisse bestätigen Risiken der nicht-ionisierenden Strahlung, umwelt · medizin · gesellschaft 29 (3), 15–25. Englische Version: Wireless communication technologies: new study findings confirm risks of nonionizing radiation.
- Holovska K, Almasiova V, Cigankova V, Benova K, Racekova E, Martoncikova M (2015): Structural and ultrastructural study of rat liver influenced by electromagnetic radiation. *J Toxicol Environ Health Part A* 78 (6), 353–356
- Huss A, Egger M, Hug K, Huwiler-Müntener K, Rössli M (2007): Source of funding and results of studies of health effects of mobile phone use: systematic review of experimental studies. *Environ Health Perspect* 115 (1), 1–4
- Kamali K, Atarod M, Sarhadi S, Nikbakht J, Emami M, Maghsoudi R, Salimi H, Fallahpour B, Kamali N, Momtazan A, Ameli M (2017): Effects of electromagnetic waves emitted from 3G+wi-fi modems on human semen analysis. *Urologia* 84 (4), 209–214
- Kesari KK, Behari J, Kumar S (2010a): Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain. *Int J Radiat Biol* 86 (4), 334–343
- Kesari KK, Behari J (2010b). Effect of microwave at 2.45 GHz radiations on reproductive system of male rats. *Toxicol Environ Chem* 92 (6), 1135–1147
- Kesari KK, Kumar S, Behari J (2012): Pathophysiology of microwave radiation: effect on rat brain. *Appl Biochem Biotechnol* 166, 379–388
- Kim MJ, Rhee SJ (2004): Green tea catechins protect rats from microwave-induced oxidative damage to heart tissue. *J Med Food* 2004 7 (3), 299–304
- Komatsubara Y, Hirose H, Sakurai T, Koyama S, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J (2005): Effect of high-frequency electromagnetic fields with a wide range of SARs on chromosomal aberrations in murine m5S cells. *Mutat Res* 587, 114–119
- Kumar S, Kesari KK, Behari J (2011): The therapeutic effect of a pulsed electromagnetic field on the reproductive patterns of male Wistar rats exposed to a 2.45-GHz microwave field. *Clinics* 66 (7), 1237–1245
- Kumari K, Meena R, Kumar S, Rajamani P, Verma NH, Kesari KK (2012): Radiofrequency electromagnetic field exposure effects on antioxidant enzymes and liver function tests. *Int J Life Sci* 1 (3), 238–244
- Lai H, Horita A, Chou CK, Guy AW (1983): Psychoactive-drug response is affected by acute low-level microwave irradiation. *Bioelectromagnetics* 4, 205–214
- Lai H, Horita A, Chou CK, Guy AW (1986): Effect of low-level microwave irradiation on hippocampal and frontal cortical choline uptake are classically conditionable. *Pharmac Biochem Behav* 27 (4), 635–639
- Lai H, Horita A, Chou CK, Guy AW (1987b): Low-level microwave irradiation affects central cholinergic activity in the rat. *J Neurochem* 48 (1), 40–45
- Lai H, Horita A, Guy AW (1988): Acute low-level microwave exposure and central cholinergic activity: studies on irradiation parameters. *Bioelectromagnetics* 9 (4), 355–362
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1989a): Low-level microwave irradiation and central cholinergic systems. *Pharmac Biochem Behav* 33, 131–138
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1989b): Low-level microwave exposure and central cholinergic activity: a dose-response study. *Bioelectromagnetics* 10 (2), 203–208
- Lai H, Carino MA, Wen YF, Horita A, Guy AW (1991): Naltrexone pretreatment blocks microwave-induced changes in central cholinergic receptors. *Bioelectromagnetics* 12 (1), 27–33
- Lai H, Horita A, Guy AW (1994): Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat. *Bioelectromagnetics* 15 (2), 95–104
- Lai H, Singh NP (1995): Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16 (3), 207–210
- Lai H, Singh NP (1996a): Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int J Radiat Biol* 69 (4), 513–521
- Lai H, Carino MA, Horita A, Guy AW (1996b): Intraseptal microinjection of  $\beta$ -funaltrexamine blocked a microwave-induced decrease of hippocampal cholinergic activity in the rat. *Pharmac Biochem Behav* 53 (3), 613–616
- Lai H, Singh NP (1997): Melatonin and a spin-trap compound block radio-frequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 18 (6), 446–454
- Lai H (2004): Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on spatial learning in the rat. *Physiol & Behav* 82 (5), 785–789
- Lai H, Singh NP (2005): Interaction of microwaves and a temporally incoherent magnetic field on single and double DNA strand breaks in rat brain cells. *Electromagn Biol Med* 24 (1), 23–29
- La Vignera S, Condorelli RA, Vicari E, D'Agata R, Calogero AE (2012): Effects of the exposure to mobile phones on male reproduction: a review of the literature. *J Androl* 33 (3), May/June 2012
- Lee S, Johnson D Dunbar K, Dong H, Ge X, Kim YC, Wing C, Jayathilaka N, Emmanuel N, Zhou CQ, Gerber HL, Tseng CC, Wang SM (2005): 2.45 GHz radiofrequency fields alter gene expression in cultured human cells. *FEBS Lett* 579 (21), 4829–4836
- Li M, Wang Y, Zhang Y, Zhou Z, Yu Z (2008): Elevation of plasma corticosterone levels and hippocampal glucocorticoid receptor translocation in rats: a potential mechanism for cognition impairment following chronic low-power-density microwave exposure. *J Radiat Res* 49 (2), 163–70
- Litovitz TA, Penafiel LM, Farrel JM, Krause D, Meister R, Mullins JM (1997): Bioeffects induced by exposure to microwaves are mitigated by superposition of ELF noise. *Bioelectromagnetics* 18, 422–30
- Maes A, Verschaevae L, Arroyo A, De Wagter C, Verbruggen L (1993): In vitro cytogenetic effects of 2.450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 14, 495–501
- Maganioti AE, Papageorgiou CC, Hountala C, Kyprianou MA, Rabavilas AD, Papadimitriou GN, Capsalis CN (2010): Wi-Fi electromagnetic fields exert gender related alterations on EEG. 6th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields. [www.researchgate.net/publication/267816859](http://www.researchgate.net/publication/267816859)
- Margaritis LH, Manta AK, Kokkaliaris KD, Schiza D, Alimisis K, Barkas G, Georgiou E, Giannakopoulou O, Kollia I, Kontogianni G, Kourouzidou A, Myari A, Roumelioti F, Skourliakou A, Sykioti V, Varda G, Xenos K, Ziomas K (2014): *Drosophila* oogenesis as a bio-marker responding to EMF sources. *Electromagn Biol Med* 33 (3), 165–189
- Marquardt H, Schäfer SG (1994): Lehrbuch der Toxikologie, Wissenschaftsverlag Mannheim, ISBN 3-411-16321-6
- Meena R, Kumari K, Kumar J, Rajamani P, Verma HN, Kesari KK (2014): Therapeutic approaches of melatonin in microwave radiations-induced oxidative stress mediated toxicity on male fertility pattern of Wistar rats. *Electromagn Biol Med* 33 (2), 81–91
- Megha K, Deshmukh PS, Banerjee BD, Tripathi AK, Ahmed R, Abegaonkar MP (2015): Low intensity microwave radiation induced oxidative stress, inflammatory response and DNA damage in rat brain. *Neurotoxicology* 51, 158–165
- Misa-Agustiño MJ, Leiro JM, Jorge-Mora MT, Rodríguez-González JA, Jorge-Barreiro FJ, Ares-Pena FJ, López-Martín E (2012): Electromagnetic fields at 2.45 GHz trigger changes in heat shock proteins 90 and 70 without altering apoptotic activity in rat thyroid gland. *Biol Open* 1, 831–838

- Misa-Agustiño MJ, Leiro-Vidal JM, Gomez-Amoza JL, Jorge-Mora MT, Jorge-Barreiro FJ, Salas-Sánchez AA, Ares-Pena FJ, López-Martín E (2015): MF radiation at 2.450 MHz triggers changes in the morphology and expression of heat shock proteins and glucocorticoid receptors in rat thymus. *Life Sci* 127, 1–11
- Nakamura H, Nagase H, Keiki Ogino K, Hatta K, Matsuzaki I (2000): Uteroplacental circulatory disturbance mediated by prostaglandin F2a in rats exposed to microwaves. *Reprod Toxicol* 14, 235–240
- Naziroğlu M, Gümral N (2009): Modulator effects of L-carnitine and selenium on wireless devices (2.45 GHz)-induced oxidative stress and electroencephalography records in brain of rat. *Int J Radiat Biol* 85 (8), 680–689
- Naziroğlu M, Celik Ö, Özgül C, Cig B, Dogan S, Bal R, Gümral N, Rodriguez AB, Pariente JA (2012a): Melatonin modulates wireless (2.45 GHz)-induced oxidative injury through TRPM2 and voltage gated Ca<sup>2+</sup> channels in brain and dorsal root ganglion in rat. *Physiol Behav* 105 (3), 683–692
- Naziroğlu M, Cig B, Dogan S, Uguz AC, Dilek S, Faouzi D (2012b): 2.45-Gz wireless devices induce oxidative stress and proliferation through cytosolic Ca<sup>2+</sup> influx in human leukemia cancer cells. *Int J Radiat Biol* 88 (6), 449–456
- Naziroğlu M Tokat S, Demirci S (2012c): Role of melatonin on electromagnetic radiation-induced oxidative stress and Ca<sup>2+</sup> signaling molecular pathways in breast cancer. *J Recept Signal Transduct Res* 32 (6), 290–297
- Naziroğlu M, Akman H (2014): Effects of cellular phone- and Wi-Fi-induced electromagnetic radiation on oxidative stress and molecular pathways in brain, in: I. Laher I (ed): *Systems biology of free radicals and antioxidants*, Springer Berlin Heidelberg, 106, 2431–2449
- Özorak A, Naziroğlu M, Celik O, Yüksel M, Özcelik D, Ozkaya MO, Cetin H, Kahya MC, Kose SA (2013): Wi-Fi (2.45 GHz)- and mobile phone (900 and 1800 MHz)-induced risks on oxidative stress and elements in kidney and testis of rats during pregnancy and the development of offspring. *Biol Trace Elem Res* 156 (1–3), 221–229
- Oksay T, Naziroğlu M, Doğan S, Güzel A, Gümral N, Koşar PA (2014): Protective effects of melatonin against oxidative injury in rat testis induced by wireless (2.45 GHz) devices. *Andrologia* 46 (1), 65–72
- Orendáčová J, Raceková E, Orendáč M, Martončíková M, Saganová K, Lievajová K, Abdiová H, Labun J, Gálik J (2009): Immunohistochemical study of postnatal neurogenesis after whole-body exposure to electromagnetic fields: evaluation of age- and dose-related changes in rats. *Cell Mol Neurobiol* 29 (6–7), 981–990
- Orendáčová J1, Orendáč M, Mojžiš M, Labun J, Martončíková M, Saganová K, Lievajová K, Blaško J, Abdiová H, Gálik J, Račeková E (2011): Effects of short-duration electromagnetic radiation on early postnatal neurogenesis in rats: Fos and NADPH-d histochemical studies. *Acta Histochem* 113 (7), 723–728
- Othman H, Ammari M, Rtibi K, Bensaid N, Sakly M, Abdelmelek H (2017): Postnatal development and behavior effects of in-utero exposure of rats to radiofrequency waves emitted from conventional WiFi devices. *Environ Toxicol Pharmacol* 52, 239–247
- Paknahad M, Mortazavi SMJ, Shahidi S, Mortazavi G, Haghani M (2016): Effect of radio frequency radiation from Wi-Fi devices on mercury release from amalgam restorations. *J Environ Health Sci and Eng* 14, Artikel 12
- Panagopoulos DJ et al. (2015): Polarization: a key difference between man-made and natural electromagnetic fields, in regard to biological activity. *Sci Rep* 5, 14914
- Papageorgiou CC, Hountala CD, Maganioti AE, Kyprianou MA, Rabavilas AD, Papadimitriou GN, Capsalis CN (2011): Effects of Wi-Fi signals on the p300 component of event-related potentials during an auditory haying task. *J Integr Neurosci* 10 (2), 189–202
- Paulraj R, Behari J (2006a): Protein kinase C activity in developing rat brain cells exposed to 2.45 GHz radiation. *Electromagn Biol Med* 25 (1), 61–70
- Paulraj R, Behari J (2006b): Single strand DNA breaks in rat brain cells exposed to microwave radiation. *Mutat Res* 596 (1–2), 76–80
- Prasad M et al. (2017): Mobile phone use and risk of brain tumours: a systematic review of association between study quality, source of funding, and research outcomes. *Neurol Sci* 38 (5), 797–810
- Sailli L, Hanani A, Smirani C, Azzouz I, Azzouz A, Sakly M, Abdelmelek H, Bouslam Z (2015): Effects of acute exposure to WIFI signals (2.45 GHz) on heart variability and blood pressure in Albinos rabbit. *Environ Toxicol Pharmacol* 40 (2), 600–605
- Salah MB, Abdelmelek H, Abderraba M (2013): Effects of olive leave extract on metabolic disorders and oxidative stress induced by 2.45 GHz WIFI signals. *Environ Toxicol Pharmacol* 36 (3), 826–834
- Sangün O, Dunder B, Darici H, Comlekci S, Doguc DK, Celik S (2015): The effects of long-term exposure to a 2.450 MHz electromagnetic field on growth and pubertal development in female Wistar rats. *Electromagn Biol Med* 34 (1), 63–71
- Sarkar S, Ali S, Behari J (1994): Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutat Res* 320, 141–147
- Scheler K (2016): Polarisation: Ein wesentlicher Faktor für das Verständnis biologischer Effekte von gepulsten elektromagnetischen Wellen niedriger Intensität, 12-seitige Beilage in *umwelt · medizin · gesellschaft* 29 (3)
- Schweizer Bundesrat (2015): „Zukunftstaugliche Mobilfunknetze“, Bericht des Schweizer Bundesrates in Erfüllung der Postulate Noser (12.3580) und FDP-Liberale Fraktion (14.3149), 2015, 4; [www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaeft/zukunftstaugliche-mobilfunknetze.html](http://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaeft/zukunftstaugliche-mobilfunknetze.html)
- Shahin S, Singh VP, Shukla RK, Dhawan A, Gangwar RK, Singh SP, Chaturvedi CM (2013): 2.45 GHz microwave irradiation-induced oxidative stress affects implantation or pregnancy in mice, *Mus musculus*. *Appl Biochem Biotechnol* 169, 1727–1751
- Shahin S, Mishra V, Singh SP, Chaturvedi CM (2014): 2.45-GHz microwave irradiation adversely affects reproductive function in male mouse, *Mus musculus* by inducing oxidative and nitrosative stress. *Free Radic. Res* 48, 511–525
- Shahin S, Banerjee S, Singh SP, Chaturvedi CM (2015): 2.45 GHz microwave radiation impairs learning and spatial memory via oxidative/nitrosative stress induced p53-dependent/independent hippocampal apoptosis: molecular basis and underlying mechanism. *Toxicol Sci* 148 (2), 380–399
- Shahin S, Banerjee S, Swarup V, Singh SP, Chaturvedi CM (2017): 2.45 GHz Microwave radiation impairs hippocampal learning and spatial memory: involvement of local stress mechanism induced suppression of iGluR/ERK/CREB signaling. *Toxicol Sci*, kfx221
- Shokri S, Soltani A, Kazemi M, Sardari D, Mofrad FB (2015): Effects of Wi-Fi (2.45 GHz) exposure on apoptosis, sperm parameters and testicular histomorphometry in rats: a time course study. *Cell J*. 17 (2), 322–331
- Sinha RK, Aggarwal Y, Upadhyay PK, Dwivedi A, Keshri AK, Das BN (2008): Neural network-based evaluation of chronic non-thermal effects of modulated 2.450 MHz microwave radiation on electroencephalogram. *Ann Biomed Eng* 36 (5), 839–851
- Sinha RK (2008): Chronic non-thermal exposure of modulated 2.450 MHz microwave radiation alters thyroid hormones and behavior of male rats. *Int J Radiat Biol* 84 (6), 505–513
- Slesin L (2006): „Radiation research“ and the cult of negative Results. A Microwave News investigation. [microwavenews.com/RR.htm](http://microwavenews.com/RR.htm)
- Soran ML, Stan M, Niinemets U, Copolovici L (2014): Influence of microwave frequency electromagnetic radiation on terpene emission and content in aromatic plants. *J Plant Physiol* 171 (15), 1436–1443
- Szmigielski S, Szudzinski A, Pietraszek A, Bielec M, Janiak M, Wrembel JK (1982): Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2.450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 3 (2), 179–191
- Taheri M, Mortazavi SMJ, Moradi M, Mansouri Sh, Nouri F, Mortazavi SAR, Bahmanzadegan F (2015): Klebsiella pneumonia, a microorganism that approves the non-linear responses to antibiotics and window theory after exposure to Wi-Fi 2.4 GHz electromagnetic radiofrequency radiation. *J Biomed Phys Eng* 5 (3), 115–120
- Taheri M, Mortazavi SMJ, Moradi M, Mansouri S, Hatam GR, Nouri F (2017): Evaluation of the effect of radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi router and mobile phone simulator on the antibacterial susceptibility of pathogenic bacteria *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*. *Dose Response* 15 (1), 1–8
- Takashima Y, Hirose H, Koyama S, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J (2006): Effects of continuous and intermittent exposure to RF fields with a wide range of SARs on cell growth, survival, and cell cycle distribution. *Bioelectromagnetics* 27, 392–400
- Testylier G, Tonduli L, Malabiau R, Debouzy JC (2002): Effects of exposure to low level radiofrequency fields on acetylcholine release in hippocampus of freely moving rats. *Bioelectromagnetics* 23, 249–255

Thomas JR, Maitland G (1979): Microwave radiation and dextroamphetamine: evidence of combined effects on behavior of rats. *Radio Sci 14* (63), 253–258

Thomas JR, Burch LS, Yeandle SS (1979): Microwave radiation and chlordiäzoxid: synergistic effects on fixed-interval behavior. *Science* 203, 1357–1358

Thomas JR, Schvot J, Ranvard RA (1980): Behavioral effects of chlorpromazine and diazepam combined with low-level microwaves. *Neurobehav Toxicol* 2, 131–135

Tök L, Naziroğlu M, Doğan S, Kahya MC, Tök Ö (2014): Effects of melatonin on Wi-Fi-induced oxidative stress in lens of rats. *Indian J Ophthalmol* 62, 12–15

Türker Y, Naziroğlu M, Gümrall N, Celik O, Saygin M, Comlekci S, Flores-Arce M (2011): Selenium and L-carnitine reduce oxidative stress in the heart of rat induced by 2.45-GHz radiation from wireless devices. *Biol Trace Elem Res* 143 (3), 1640–1650

Voigt H (2011): Unfruchtbarkeit beim Mann als mögliche Folge der Nutzung von Mobiltelefonen, EMF-Monitor, 5/2011, 5–7

von Klitzing L (1995): Low-frequency pulsed electromagnetic fields influence EEG of man. *Phys Med* 1995 XI (2), 77–80

von Klitzing L (2014): Einfluss elektromagnetischer Felder auf kardiovaskuläre Erkrankungen, umwelt · medizin · gesellschaft 27 (1), 17–21

von Klitzing L (2016): Artifizielles EMG nach WLAN-Langzeitexposition, umwelt · medizin · gesellschaft 29 (4), 39

Wang B, Lai H (2000): Acute exposure to pulsed 2.450 MHz microwaves affects water-maze performance of rats. *Bioelectromagnetics* 21 (1), 52–56

Wang J, Sakurai T, Koyama S, Komatsubara Y, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J (2005): Effects of 2.450 MHz electromagnetic fields with a wide range of SARs on methylcholanthrene-induced transformation in C3H10T1/2 cells. *J Radiat Res* 46, 351–361

Wang J, Koyama S, Komatsubara Y, Suzuki Y, Taki M, Miyakoshi J (2006): Effects of a 2.450 MHz high-frequency electromagnetic field with a wide range of SARs on the induction of heat-shock proteins in A172 cells. *Bioelectromagnetics* 27, 479–486

Wangemann RT, Cleary SF (1976): The in vivo effects of 2.45 GHz microwave radiation on rabbit serum components and sleeping times. *Rad Environ Biophys* 13, 89–103

Warnke U, Hensinger P (2013): Steigende „Burn-out“-Inzidenz durch technisch erzeugte magnetische und elektromagnetische Felder des Mobil- und Kommunikationsfunks, umwelt · medizin · gesellschaft 26 (1), 31–38

Englische Version: Increasing incidence of burnout due to magnetic and electromagnetic fields of cell phone networks and other wireless communication technologies

Yang X, He G, Hao Y, Chen C, Li M, Wang Y, Zhang G, Yu Z (2010): The role of the JAK2-STAT3 pathway in pro-inflammatory responses of EMF-stimulated N9 microglial cells. *J Neuroinflamm* 7, 54

Yang XS, He GL, Hao YT, Xiao Y, Chen CH, Zhang GB, Yu ZP (2012): Exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields elicits an HSP-related stress response in rat hippocampus. *Brain Res Bull* 88 (4), 371–378

Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, Kyrlylenko O, Kyrlylenko S (2016): Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med* 35 (2), 186–202

Yüksel M, Naziroğlu M, Özkaya MO (2016): Long-term exposure to electromagnetic radiation from mobile phones and Wi-Fi devices decreases plasma prolactin, progesterone, and estrogen levels but increases uterine oxidative stress in pregnant rats and their offspring. *Endocrine* 52 (2), 352–362

Zhu W, Cui Y, Feng X, Li Y, Zhang W, Xu J, Wang H Lv S (2016): The apoptotic effect and the plausible mechanism of microwave radiation on rat myocardial cells. *Can J Physiol Pharmacol* 94 (8), 849–857

Zotti-Martelli L, Peccatori M, Scarpato R, Migliore L (2000): Induction of micronuclei in human lymphocytes exposed in vitro to microwave radiation. *Mutat Res* 472, 51–58

## Register nach Endpunkten

(Autor, Veröffentlichungsdatum/Kapitel im Review)

**Apoptose:** Ballardin 2011/7, Cig 2015/4, Deshmuk 2013/4, Kumar 2011/1, Margaritis 2014/1, Meena 2014/6, Misa-Agustino 2015/9, Shahin 2015/3, Shokri 2015/1, Zhu 2016/5

**Calcium-Ionenkanäle (Ca<sup>2+</sup>):** Cig 2015/4, Hassanshahi 2017/3, Kesari 2012/4, Naziroglu 2012c/4 & 2012a/11, Panagopoulos 2015/11, Taheri 2015/12 & 2017/12

**DNA-Schädigung:** Akdag 2016/4, Avendano 2012/1,4, Chartuvedi 2011/4, Czerska 1992/4, Deshmuk 2013,4 & 2015/3,4, Gürlér 2014/4, Kesari 2010a, 2010b, 2012/4, Lai 1996 & 1997/4, Lai/Singh 1995/4 & 1996/7 & 1997/3 & 2005/3,4, Meena 2014/6, Megha 2015/4, Paulraj/Behari 2006/4, Sakar 1994/4, Shahin 2013/1, Taheri 2015/12 & 2017/12, Zotti-Martelli 2000/4,

**EEG/Gehirnentwicklung:** Chauhan 2017/6, Maganioti 2010/2, Naziroglu/Gümrall 2009/2, Othmann 2017/6, Papageorgiou 2011/2, Paulraj/Behari 2006/2,4, Sinha 2008/2, Testylier 2002/2, von Klitzing 1995/2 & 2016/2, Yang 2010/2, Yang 2012/2

**Embyro/Schwangerschaft/Reproduktionskapazität:** Cleary 1996/7, Margaritis 2014/1, Nakamura 2000/1, Özorak 2013/6, Othmann 2017/6, Sangün 2015/1, Shahin 2013/1, Yüksel 2016/6

**Gedächtnis, Lernen, Verhalten:** Cammaerts/Johannson 2014/3, Chartuvedi 2011/3, Deshmuk 2015/3, Hassanshahi 2017/3, Lai 2004/3 & 1987a & 1987b & 1988 & 1989a & 1989b & 1991 & 1994 & 1996b/2, Li 2008/3, Othmann 2017/6, Orendocova 2011/2, Paulraj 2006a/2, Sangün 2015/1, Shahin 2015/3, Sinha 2008/3,9, Thomas 1980/3, Wang/Lai 2000/3

**Gene/Genexpression:** Kesari 2010b/4, Lee 2005/10, Orendocova 2011/2, Yang 2010/2, Yang 2012/2,

**Glucosestoffwechsel:** Salah 2013/6

**Herz:** Kim/Rhee 2004/6, Sali 2015/5, von Klitzing 2014/5 & 2016/5, Zhu 2016/5

**Hitzeschockproteine (HSP):** Deshmuk 2015/3, Misa-Agustino 2012/9 & 2015/9, Yang 2012/2,

**Hormone:** Shahin 2013/1, Yüksel 2016/6

**Krebs:** Czerska 1992/4, Eser 2013/6, Sarkar 1994/4, Szmigielski 1982/4, Yang 2010/2

**Leber:** Chauhan 2017/6, Holovska 2015/8, Kumari 2012/6,8, Salah 2013/6,

**Oxidativer Zellstress:** Atasoy 2013/6, Aweda 2003/6, Aynali 2013/6, Ceyhan 2012/6, Chauhan 2017/6, Chen 2009/13, Cig 2015/4, Deshmuk 2013/4 & 2015/4, Eser 2013/6, Gümrall 2009/6, Gürlér 2014/4, Kesari 2010a, 2010b, 2012/4, Kim/Rhee 2004/6, Kumar 2011/1, Kumari 2012/6/8, Lai/Singh 1994/4, Meena 2014/1,6, Megha 2015/4, Misa-Agustino 2015/9, Naziroglu/Gümrall 2009/2, Naziroglu 2012a/11 & 2012b/11 & 2012c/4, Oksay 2014/6, Othmann 2017/6, Özorak 2013/1, Sali 2015/5, Salah 2013/6, Sangün 2015/1, Shahin 2013/1 & 2014/1 & 2015/3, Soran 2014/13, Tök/Naziroglu 2014/6, Türker 2011/6, Yakymenko 2016/6, Yüksel 2016/16, Zhu 2016/5

**Milz:** Chauhan 2017/6

**Neurotransmitter:** Aggarwal 2013/2, Lai 1996/3

**Nieren:** Özorak 2013/1,6

**Schilddrüse:** Misa-Agustino 2013,9 & 2015/9, Sinha 2008/3,9

**Spermien/Hoden:** Akdag 2016/1, Atasoy 2013/6, Avendano 2012/1,4, Dasdag 2015/1, Meena 2014/1,6, Oksay 2014/6, Özorak 2013/6,1, Sarkar 1994/4, Shahin 2014/1, Shokri 2015/1

**Testosteron:** Meena 2014/6

**Zellwachstum und -zyklus:** Ballardin 2011/7, Cleary 1996/7, Naziroglu 2012b/11, Orendocova 2009/2